สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

สายอากาศติดตามเป้าหมายแบบโมโนพัลส์สำหรับความถี่ 4.4 – 4.8 GHz

4.4– 4.8 GHz MONOPULSE TRACKING ANTENNA

โดย

นายเกียรติศักดิ์ นวนิล

นายธรรมนูญ สถิตย์มั่น

ปพ
ก855ค
2550

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....82952
วัน,เดือน,ปี.....29 ก.ค. 2551

.b.....11956999
.i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศติดตามเป้าหมายแบบโมโนพัลส์ความถี่ 4.4 – 4.8 GHz

4.4– 4.8 GHz MONOPULSE TRACKING ANTENNA

โดย

นายเกียรติศักดิ์ นวนิล 48015002

นายธรรมนูญ สถิตย์มั่น 48015011

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.ทองทด วานิชศรี

ผศ.ดร.ชูวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2550

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง **สายอากาศติดตามเป้าหมายแบบโมโนพัลส์สำหรับความถี่ 4.4 – 4.8 GHz**

4.4– 4.8 GHz MONOPULSE TRACKING ANTENNA

ผู้จัดทำ

1. นายเกียรติศักดิ์ นวนิล 48015002

2. นายธรรมนูญ สถิตย์มั่น 48015011

(.....) อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.ทองทด วานิชศรี)

(.....) อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร.ชูวงศ์ พงศ์เจริญพาณิชย์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศติดตามเป้าหมายแบบโมโนพัลส์ความถี่ 4.4-4.8 GHz

4.4-4.8 GHz MONOPULSE TRACKING ANTENNA

โดย นายเกียรติศักดิ์ นวนิล 48015002

นายธรรมนูญ สถิตย์มั่น 48015011

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ทองทด วานิชศรี

ผศ.ดร.ชูวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์

บทคัดย่อ

โครงงานนี้นำเสนอการออกแบบและทดสอบระบบสายอากาศติดตามเป้าหมายอัตโนมัติ แบบโมโนพัลส์ ที่ความถี่ 4.73 GHz โดยใช้สายอากาศแบบเกลียว 4 ตัววางตัวเป็นแบบสี่เหลี่ยมจัสตุรัส และนำสัญญาณที่ได้จากสายอากาศแต่ละตัวมาใช้ในการเปรียบเทียบขนาดของสัญญาณที่รับได้ ไปวิเคราะห์หาตำแหน่งของการรับสัญญาณที่ดีที่สุด

ABSTRACT

A design and implementation of monopulse tracking antenna system is presented in this project. The receiving antenna unit is designed at 4.73 GHz by using 4 helical antennas arranging in square geometry. The monopulse signal comparator is employed to process the four receiving signals. The summation and two difference signals from the monopulse comparator are used to control the antenna direction to yield the maximum receiving signal.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับคำแนะนำ ความรู้และความช่วยเหลือในด้านต่างๆจากท่านทั้งหลายเหล่านี้

ผศ.ดร. ทองทด วานิชศรี อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.ชูวงค์ พงศ์เจริญพาณิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษา

และที่ขาดไม่ได้ก็ต้องขอขอบคุณ พี่ ป.โทและเพื่อนทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ความรู้ต่างๆ และรวมไปถึง ความช่วยเหลือในการทำงานตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา

คณะผู้จัดทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	
บทที่ 2 ทฤษฎีหรือหลักการ	
2.1 ระบบติดตามการรับสัญญาณแบบอัตโนมัติ	2
2.1.1 วิธีการสร้างพูเป็นลำดับ (Sequential Lobing)	3
2.1.2 วิธีการกวาดแบบกรวย (Conical Scan)	4
2.1.3 ระบบติดตามแบบขั้น (Step Track System)	5
2.1.4 ระบบการติดตามแบบใช้โปรแกรม (Program Track System)	6
2.1.5 ระบบติดตามเป้าหมายอัตโนมัติแบบโมโนพัลส์	6
2.2 เทคนิคการวัดมุมผิดพลาดในระบบโมโนพัลส์	7
2.2.1 การเปรียบเทียบด้วยเฟส	7
2.2.2 การเปรียบเทียบด้วยขนาด	9
2.3 ทฤษฎีเบื้องต้นของสายอากาศเฮลคอล	11
2.3.1 โครงสร้างของสายอากาศเฮลิคอล	11
2.3.2 โหมดของกระแสบนสายอากาศเฮลิคอล	12
2.3.3 คุณสมบัติของสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน	14
2.3.4 การกระจายคลื่นจากสายอากาศเฮลิคอลในโหมดแนวแกน	16
2.4 ภาควิเคราะห์สัญญาณ	21
2.4.1 ตัวเปรียบเทียบ (Comparator)	21
2.4.2 หลักการทำงานของไฮบริดริง	21
บทที่ 3 การออกแบบและการสร้าง	
3.1 การออกแบบตัวเปรียบเทียบสัญญาณ	23
3.2 การออกแบบสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน	26
3.3 โครงสร้างที่จะนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า	31
3.4 การวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆของไฮบริดริงจังชั่นโดยอาศัยโปรแกรมการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้ารุ่นที่ 5 (Microwave Studio Version 5) หรือ CST	31
3.4.1การจำลองโครงสร้างไฮบริดริงลงในโปรแกรมการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าหรือ CST	32
3.4.2 ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม CST ของไฮบริดริงจังชั่นที่ความถี่กลาง 4.73 GHz	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

เรื่อง	หน้า
3.4.3 สรุปผลการวิเคราะห์ไฮบริดริงจังชั่น	42
3.5 การวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆของสายอากาศเฮลิคอลโดยใช้โปรแกรม การคำนวณแม่เหล็กฟ้ารุ่นที่ 5 (Microwave Studio Version 5) หรือ CST	43
3.5.1 การจำลองโครงสร้างลงในโปรแกรมการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าหรือCST	44
3.5.2 ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม CST ของสายอากาศเฮลิคอลที่ความถี่ กลาง 4.73 GHz	48
3.5.3 สรุปผลการวิเคราะห์สายอากาศเฮลิคอล	51
บทที่ 4 ผลการทดสอบและผลการทดลอง	
4.1 การทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer)	52
4.2 การทดสอบอัตราการสูญเสียย้อนกลับ ค่าอิมพีแดนซ์ และค่าแพทเทอร์น ของสายอากาศเฮลิคอล (*Return Loss , Impedance , Radiation pattern*)	52
4.2.1 การทดสอบอัตราการสูญเสียย้อนกลับ อิมพีแดนซ์ของสาย และค่า vswr อากาศเฮลิคอลที่ความถี่ 4.73 GHz	54
4.2.2 การทดสอบ Gain และ Pattern ของสายอากาศเฮลิคอลที่ความถี่ 4.73 GHz	60
4.2.3 สรุปผลการทดลองสายอากาศเฮลิคอล	61
4.3 การทดสอบอัตราส่งผ่าน และเฟส ของ Hybrid Ring Junction ที่ความถี่ 4.73 GHz	62
4.3.1 การทดสอบอัตราการส่งผ่าน และเฟสของ Hybrid Ring Junction ที่ความถี่ 4.73 GHz	63
4.3.2 การทดสอบเฟสของ Monopulse Comparator	79
4.3.3 สรุปผลการทดลองไฮบริดริง	86
4.4 การทดลอง Monopulse Tracking Antenna	86
4.4.1 การทดลองวัด Pattern ของ Monopulse Tracking Antenna	87
4.4.2 สรุปผลการทดลอง Monopulse Tracking Antenna	88
บทที่ 5 บทสรุปและบทวิจารณ์	
5.1สรุปผลการทดลอง	89
5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการสร้าง	89
5.3 แนวทางการแก้ไข	90
5.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงงาน	90
หนังสืออ้างอิง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 บล็อคไดอะแกรมของระบบติดตามสัญญาณแบบอัตโนมัติ	2
2.2 รูปแบบของสายอากาศการสลับพูดลื่นและสัญญาณที่บอกความผิดพลาดใน 1มิติ	3
2.3 การทำงานของวิธีกวาดแบบกรวย	4
2.4 บล็อคไดอะแกรมของวิธีการกวาดแบบกรวย	5
2.5 บล็อคไดอะแกรมของตัววิเคราะห์สัญญาณผิดพลาดสำหรับระบบติดตามแบบใช้โปรแกรม	6
2.6 การเปรียบเทียบด้วยเฟส	8
2.7 บล็อคไดอะแกรมของการเปรียบเทียบด้วยเฟส	8
2.8 การเปรียบเทียบด้วยขนาด	9
2.9 รูปแบบของสายอากาศที่ใช้ในการเปรียบเทียบด้วยขนาด	10
2.10 บล็อคไดอะแกรมของระบบโมโนพัลส์ที่ใช้การเปรียบเทียบด้วยขนาด	10
2.11 โครงสร้างของสายอากาศเฮลิคอล	12
2.12 ประจุไฟฟ้าชั่วขณะที่เกิดขึ้นบนสายอากาศเฮลิคอลโหมดต่างๆ	13
2.13 รูปแสดงแพทเทิร์นสายอากาศเฮลิคอลทั้งสองโหมด	13
2.14 รูปแสดงการโพลาไรเซชั่น (*Polarization*)	14
2.15 ลักษณะการไหลของกระแสบนสายอากาศเฮลิคอลขนาดต่างๆ	15
2.16 โครงสร้างสายอากาศเฮลิคอลกับการคิดระยะทางไปยังจุดสังเกต	17
2.17 ค่าอัตราส่วนของการโพราไรเซชั่นในแกนหลักของสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน	19
2.18 ลักษณะแพทเทิร์นของสายอากาศเฮลิคคอลที่ C_λ ต่างๆ	20
2.19 ลักษณะแพทเทิร์นสายอากาศเฮลิคอลที่จำนวนรอบ (n) ต่างๆ	20
2.20 ไฮบริดริง หรือ ไฮบริดแบบวงกลม	21
3.1 ลักษณะโครงสร้างของไฮบริดริงจังชั่น	23
3.2 แถบสตริปของวงจรไฮบริดริงจังชั่นที่ได้จากการคำนวณ	25
3.3 แถบของวงจรไฮบริดริงจังชั่นขนาดเท่าของจริง	25
3.4 บล็อคไดอะแกรมการทำงานของไฮบริดริงเมื่อนำมาเปรียบเทียบสัญญาณจากสายอากาศ 4 ตัว	25
3.5 ไฮบริดริงเมื่อนำมาต่อเป็นวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ(Monopulse hybrid assembly)	26
3.6 แพทเทอร์นของสายอากาศเฮลิคอลเมื่อมีความเร็วเฟสของกระแสต่างกัน	27
3.7 รูปโครงสร้างไฮบริดริงที่จำลองโครงสร้างโดยใช้โปรแกรม CST	31
3.8 การกำหนดหน่วยการวัดเป็นมิลลิเมตร	32
3.9 การกำหนดโครงสร้างของไฮบริดริงจังชั่น	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 กำหนดสภาวะภายนอกของการวิเคราะห์	33
3.11 กำหนดช่วงความถี่ที่ป้อนให้กับไฮบริดริงจังชั่น	33
3.12 (ก) ช่องทางป้อนสัญญาณที่ 1	34
3.12 (ข) ช่องทางป้อนสัญญาณที่ 1	34
3.12 (ค) ช่องทางป้อนสัญญาณที่ 3	35
3.12 (ง) ช่องทางป้อนสัญญาณที่ 4	35
3.13 กำหนดความถี่ที่ต้องการดูลักษณะการส่งผ่าน	36
3.14 การวิเคราะห์คุณสมบัติของไฮบริดริงจังชั่น	36
3.15 ผลจากการจำลองการทำงานของไฮบริดริงด้วยโปรแกรมCST	37
3.16(ก) การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ตที่ 1 ไปยังพอร์ตที่ 3 และ จากพอร์ตที่ 3ไปยังพอร์ตที่ 1	38
3.16(ข) การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ตที่ 1 ไปยังพอร์ตที่ 4 และ จากพอร์ตที่ 4ไปยังพอร์ตที่ 1	39
3.16(ค) การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ตที่ 2 ไปยังพอร์ตที่ 3 และ จากพอร์ตที่ 3ไปยังพอร์ตที่ 2	40
3.16(ง) การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ตที่ 2 ไปยังพอร์ตที่ 4 และ จากพอร์ตที่ 4ไปยังพอร์ตที่ 2	41
3.17 การส่งผ่านสัญญาณในแต่ละช่องสัญญาณที่ความถี่ 3 GHz	42
3.18รูปโครงสร้างสายอากาศเฮลิคอลที่จำลองโครงสร้างโดยใช้โปรแกรม CST	43
3.19 การกำหนดหน่วยการวัดเป็นมิลลิเมตร	44
3.20 การกำหนดโครงสร้างของไฮบริดริงจังชั่น	45
3.21 กำหนดสภาวะภายนอกของการวิเคราะห์	45
3.22 กำหนดช่วงความถี่ที่ป้อนให้กับไฮบริดริงจังชั่น	45
3.23 ช่องทางการป้อนคลื่น	46
3.24 กำหนดความถี่ที่ต้องการดูลักษณะการส่งผ่าน	46
3.25 การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศเฮลิคอล	47
3.26 (ก) กราฟคุณลักษณะของ S_{11}	48
3.26 (ข) กราฟคุณลักษณะของ S_{11}	48
3.27 (ค) Farfield ของสายอากาศเฮลิคอลที่จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CST	49
3.27 (ง) Farfield ของสายอากาศเฮลิคอลที่จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CST	50
3.28 Smith chart สายอากาศเฮลิคอลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CST	51
4.1 การต่ออุปกรณ์การทดสอบ Return Loss , Impedance ของสายอากาศเฮลิคอล	52
4.2 การต่ออุปกรณ์การทดสอบ Gain และ pattern ของสายอากาศเฮลิคอล	53
4.3 การทดสอบการวัดค่า Return Loss , Impedance ของสายอากาศเฮลิคอล	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4 (ก) กราฟแสดงคุณสมบัติการสูญเสียย้อนกลับ Return Loss ของสายอากาศเฮลิคอลตัวที่ 1	54
4.4 (ข) กราฟแสดงคุณสมบัติการสูญเสียย้อนกลับ Return Loss ของสายอากาศเฮลิคอลตัวที่ 2	54
4.4 (ค) กราฟแสดงคุณสมบัติการสูญเสียย้อนกลับ Return Loss ของสายอากาศเฮลิคอลตัวที่ 3	55
4.4 (ง) กราฟแสดงคุณสมบัติการสูญเสียย้อนกลับ Return Loss ของสายอากาศเฮลิคอลตัวที่ 4	56
4.5 (ก) กราฟแสดงคุณสมบัติเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเฮลิคอลตัวที่ 1	56
4.5 (ข) กราฟแสดงคุณสมบัติเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเฮลิคอลตัวที่ 2	56
4.5 (ค) กราฟแสดงคุณสมบัติเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเฮลิคอลตัวที่ 3	57
4.5 (ง) กราฟแสดงคุณสมบัติเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเฮลิคอลตัวที่ 4	57
4.6 (ก) กราฟแสดงคุณสมบัติ VSWR ของสายอากาศเฮลิคอลตัวที่ 1	58
4.6 (ข) กราฟแสดงคุณสมบัติ VSWR ของสายอากาศเฮลิคอลตัวที่ 2	58
4.6 (ค) กราฟแสดงคุณสมบัติ VSWR ของสายอากาศเฮลิคอลตัวที่ 3	59
4.6 (ง) กราฟแสดงคุณสมบัติ VSWR ของสายอากาศเฮลิคอลตัวที่ 4	59
4.7 การทดสอบการวัดค่า Pattern และค่า Gain ของสายอากาศเฮลิคอล	60
4.8 แสดงคุณสมบัติ Pattern ของสายอากาศเฮลิคอลทั้ง 4 ตัว	60
4.9 การต่ออุปกรณ์การทดสอบอัตราการส่งผ่าน และเฟสของ Hybrid Ring Juction	62
4.10 แสดงการทดสอบอัตราการส่งผ่าน และเฟสของ Hybrid Ring Juction	62
4.11 (ก) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 1	63
4.11 (ข) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 1	63
4.11 (ค) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 1	64
4.11 (ง) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 4 ไปยังพอร์ต 1	64
4.11 (จ) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2	65
4.11 (ฉ) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 2	65
4.11 (ช) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 2	66
4.11 (ซ) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 4 ไปยังพอร์ต 2	66
4.11 (ญ) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 3	67
4.11 (ฎ) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 3	67
4.11 (ฏ) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 3	68
4.11 (ฐ) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 4 ไปยังพอร์ต 3	68
4.11 (ฑ) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 4	69
4.11 (ฒ) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 4	69
4.11 (ณ) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 4	70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.11 (ค) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 4 ไปยังพอร์ต 4	70
4.12 (ก) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 1ไปยังพอร์ต 1	71
4.12 (ข) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 2ไปยังพอร์ต 1	71
4.12 (ค) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 3ไปยังพอร์ต 1	72
4.12 (ง) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 4ไปยังพอร์ต 1	72
4.12 (จ) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 1ไปยังพอร์ต 2	73
4.12 (ฉ) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 2ไปยังพอร์ต 2	73
4.12 (ช) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 3ไปยังพอร์ต 2	74
4.12 (ซ) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 4ไปยังพอร์ต 2	74
4.12 (ญ) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 1ไปยังพอร์ต 3	75
4.12 (ฎ) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 2ไปยังพอร์ต 3	75
4.12 (ฏ) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 3ไปยังพอร์ต 3	76
4.12 (ฐ) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 4ไปยังพอร์ต 3	76
4.12 (ฑ) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 1ไปยังพอร์ต 4	77
4.12 (ฒ) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 2ไปยังพอร์ต 4	77
4.12 (ณ) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 3ไปยังพอร์ต 4	78
4.12 (ด) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 4 ไปยังพอร์ต 4	78
4.13(ก) แสดงวงจรการนำไฮบริดริงมาต่อเป็น Monopulse Comparator	79
4.13(ข) การทดลองเมื่อนำไฮบริดริงมาต่อเป็น Monopulse Comparator	79
4.14 (ก) กราฟแสดงเฟส ระหว่างพอร์ต Sum และพอร์ต A	80
4.14 (ข) กราฟแสดงเฟส ระหว่างพอร์ต Sum และพอร์ต B	80
4.14 (ค) กราฟแสดงเฟส ระหว่างพอร์ต Sum และพอร์ต C	81
4.14 (ง) กราฟแสดงเฟส ระหว่างพอร์ต Sum และพอร์ต D	81
4.14 (ฉ) กราฟแสดงเฟส ระหว่างพอร์ต ΔAZ และพอร์ต A	82
4.14 (ช) กราฟแสดงเฟส ระหว่างพอร์ต ΔAZ และพอร์ต B	82
4.14 (ซ) กราฟแสดงเฟส ระหว่างพอร์ต ΔAZ และพอร์ต C	83
4.14 (ญ) กราฟแสดงเฟส ระหว่างพอร์ต ΔAZ และพอร์ต D	83
4.14 (ฎ) กราฟแสดงเฟส ระหว่างพอร์ต ΔELและพอร์ต A	84
4.14 (ฏ) กราฟแสดงเฟส ระหว่างพอร์ต ΔELและพอร์ต B	84
4.14 (ฐ) กราฟแสดงเฟส ระหว่างพอร์ต ΔELและพอร์ต C	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 (ฑ) กราฟแสดงเฟส ระหว่างพอร์ต ΔELและพอร์ต D	85
4.15 การต่อสายอากาศเฮลิคอลเข้ากับ Monopulse Comparator	86
4.16 แสดงการทดลอง Monopulse Tracking Antenna	86
4.17 (ก) กราฟที่ได้จากการทดลองวัด Pattern ในมุมกวาด	87
4.17 (ข) กราฟที่ได้จากการทดลองวัด Pattern ในมุมเงย	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่1
บทนำ

ในปัจจุบันนี้การสื่อสารด้านต่างๆได้เข้ามามีบทบาทต่อการดำรงชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก การสื่อสารผ่านดาวเทียมเป็นรูปแบบการสื่อสารอีกรูปแบบหนึ่งที่จำเป็นอย่างมาก ดังจะเห็นได้จากการที่ประเทศต่างๆรวมทั้งประเทศไทยมีดาวเทียมเป็นของตัวเองและมีแนวโน้มว่าจะเพิ่มจำนวนมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากข้อได้เปรียบที่เป็นระบบสื่อสารที่มีสถานีทวนสัญญาณ อยู่ที่ระดับสูงมากจนแทบจะไม่มีสิ่งที่เป็นอุปสรรคมากีดขวางเส้นทางการสื่อสาร รูปแบบการสื่อสารผ่านดาวเทียมในประเทศไทยที่มีใช้กันมากในขณะนี้ คือการแพร่กระจายภาพและเสียงในย่านความถี่ C (C-Band : 4.0 ~8.0 GHz) และย่านย่านความถี่ Ku (Ku-Band : 12.4~18.0 GHz) อุปกรณ์ที่จำเป็นต่อการรับและส่งสัญญาณดาวเทียมก็คือสายอากาศ

โดยทั่วไปแล้วระบบสายอากาศ ในกรณีที่จะรับสัญญาณเข้ามานั้นจะต้องทำการหันสายอากาศไปให้ตรงกับทิศทางหรือตำแหน่งของสัญญาณที่ส่งมา เพื่อให้สามารถรับสัญญาณนั้นได้อย่างเต็มที่ ซึ่งในสำหรับกรณีที่ตำแหน่งของการส่งสัญญาณอยู่กับที่ การรับสัญญาณจะไม่มีปัญหาเกิดขึ้น เพราะเราสามารถรู้ตำแหน่งของสัญญาณที่จะรับได้แน่นอนและคงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของสัญญาณที่จะรับ แต่สำหรับในกรณีที่ตำแหน่งของการส่งสัญญาณมีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา จะต้องทำการหันสายอากาศรับไปยังตำแหน่งที่ทำการรับสัญญาณสูงสุดตลอดเวลาเพื่อให้ได้รับสัญญาณได้เต็มที่

ระบบที่สามารถรับสัญญาณได้ตลอดเวลาโดยการปรับทิศทางสายอากาศให้ไปรับสัญญาณที่ดีที่สุดอย่างอัตโนมัติ เรียกว่า ระบบติดตามการรับสัญญาณแบบอัตโนมัติ (Autotracking System) ซึ่งมีใช้ทั่วไปในระบบของเรดาห์ (Radar System) และในการรับสัญญาณดาวเทียมของสถานีภาคพื้นดินสำหรับการติดตามตำแหน่งของดาวเทียม

โดยปกติแล้วตำแหน่งของดาวเทียมนั้นจะดูคล้ายว่ามีตำแหน่งอยู่กับที่เมื่อเทียบจากพื้นโลก แต่ในความเป็นจริงแล้วดาวเทียมมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา เพราะว่าเมื่อโลกหมุนรอบตัวเองตลอดเวลาในขณะเดียวกันโลกก็หมุนรอบดวงอาทิตย์ตลอดเวลาเช่นกัน จึงทำให้ดาวเทียมต้องหมุนรอบโลกและดวงอาทิตย์ตลอดเวลา ส่งผลให้ตำแหน่งของการส่งสัญญาณเกิดการเคลื่อนที่ เมื่อตำแหน่งการส่งสัญญาณเคลื่อนที่ตำแหน่งของการรับสัญญาณจึงเคลื่อนที่ด้วย ดังนั้นจึงต้องใช้ระบบติดตามการสัญญาณดาวเทียมแบบอัตโนมัติ เพื่อที่จะหมุนจานสายอากาศให้สามารถรับสัญญาณสูงสุดตลอดเวลา

ปริญญานิพนธ์ชุดนี้มีจุดประสงค์ในการศึกษา ออกแบบและทดลองใช้ระบบติดตามการรับสัญญาณอัตโนมัติแบบโมโนพัลล์ ในส่วนของภาครับและภาควิเคราะห์สัญญาณ กรณีที่ต้องรับสัญญาณจากดาวเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ระบบติดตามการรับสัญญาณแบบอัตโนมัติ

ระบบติดตามการรับสัญญาณแบบอัตโนมัติ คือ ระบบที่สามารถรับสัญญาณได้ตลอดเวลาโดยการหมุนจานสายอากาศให้ไปรับสัญญาณได้อย่างอัตโนมัติ ซึ่งจะมีใช้โดยทั่วไปเช่นในระบบเรดาห์และในการรับสัญญาณดาวเทียมที่สถานีภาคพื้นดิน

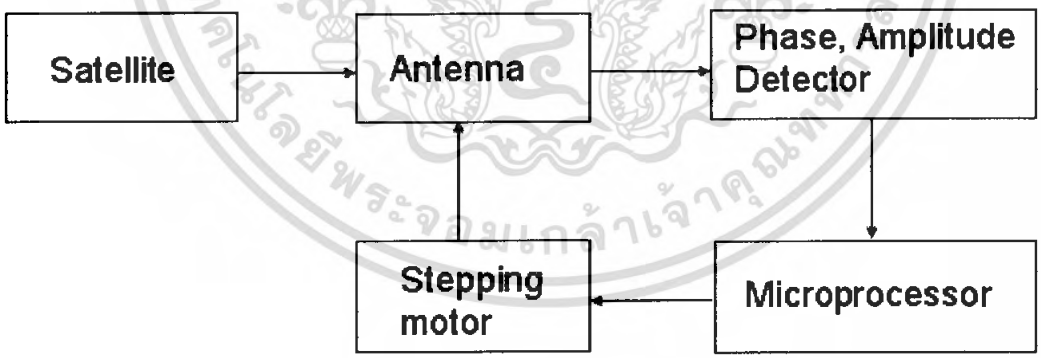
ระบบติดตามการรับสัญญาณแบบอัตโนมัติมีส่วนประกอบ 3 ส่วน ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ภาครับสัญญาณ ได้แก่ ส่วนของสายอากาศที่ใช้รับสัญญาณจากดาวเทียม

2. ภาควิเคราะห์สัญญาณ เป็นส่วนของการตรวจจับสัญญาณ (Detector) ที่ได้มาจากภาครับสัญญาณ โดยจะนำมาวิเคราะห์หาตำแหน่งของดาวเทียมเพื่อให้ได้ความแม่นยำมากที่สุด แล้วจึงส่งต่อให้ยังภาคควบคุมสายอากาศ

3. ภาคควบคุมสายอากาศ เป็นส่วนของการควบคุมการเคลื่อนที่ของสายอากาศทั้งหมด โดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ (Microprocessor) และสเตปปิ้งมอเตอร์ (Stepping Motor) ให้มีการขับเคลื่อนไปยังตำแหน่งที่ต้องการโดยใช้สัญญาณที่ได้จากภาควิเคราะห์สัญญาณ

ส่วนต่างๆของระบบติดตามการรับสัญญาณแบบอัตโนมัติ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นนั้นสามารถแสดงเป็นบล็อคไดอะแกรม (Block Diagram) ได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 บล็อคไดอะแกรมของระบบติดตามสัญญาณแบบอัตโนมัติ

ระบบติดตามเป้าหมายหรือระบบติดตามสัญญาณที่ใช้ในระบบเรดาห์นั้นจะใช้หาตำแหน่งของเป้าหมาย (Target) และใช้ทำนายตำแหน่งในอนาคตของเป้าหมายนั้น โดยใช้มุมเงย (Elevation) มุมทิศ (Azimuth Angle) และทุกๆเส้นทางเดิน หรือเส้นทางเดินเดียวของเรดาห์ที่ไปยังเป้าหมายนั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

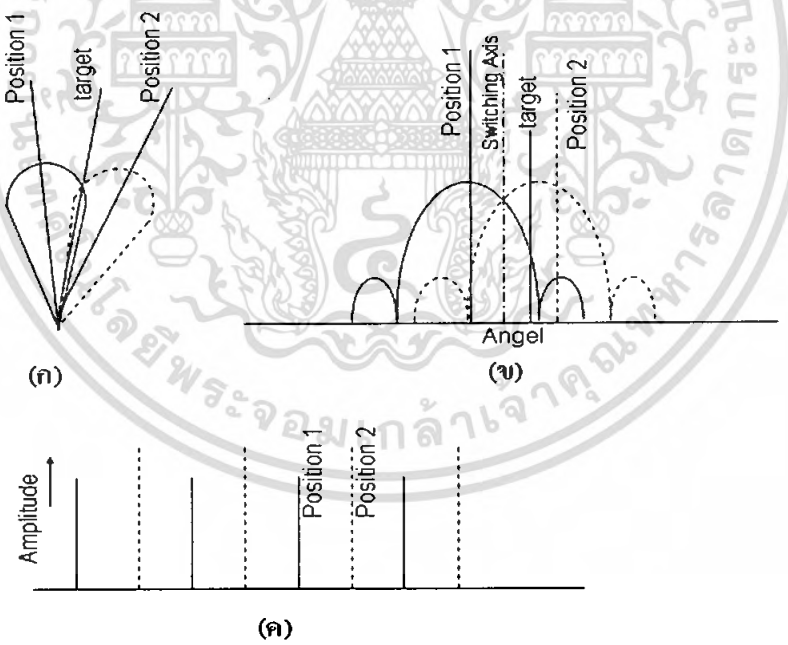
รูปแบบ (Pattern) ของสายอากาศที่ใช้ในระบบการติดตามเป้าหมาย จะถูกนำมาใช้หามุมและตำแหน่งที่ผิดพลาดไป (Error Signal) ซึ่งวิธีการหามุมและตำแหน่งที่ผิดพลาดไปนี้สามารถหาได้หลายวิธี ดังต่อไปนี้

2.1.1 วิธีการสร้างพูเป็นลำดับ (Sequential Lobing)

รูปแบบของสายอากาศที่ใช้กับระบบการติดตามเป้าหมาย ในระบบเรดาห์นั้นเป็นแบบลำคลื่นรูปปลายดินสอ (Pencil Beam) ที่สมมาตรซึ่งความกว้างของลำคลื่น (Beamwidth) ทางด้านมุมเงยและมุมทิศทางจะมีค่าเท่ากัน

ตามแนวแกนหลักของสายอากาศ ความแตกต่างระหว่างตำแหน่งของเป้าหมาย และทิศทาง อ้างอิง คือ มุมที่ผิดพลาดไป (Angel Error) ในระบบการติดตามสัญญาณของเรดาห์จะพยายามหาตำแหน่งสายอากาศที่ทำมุมผิดพลาดนั้นเป็นศูนย์ และเมื่อมีมุมผิดพลาดเป็นศูนย์แล้วเป้าหมายก็จะอยู่ในตำแหน่งทิศอ้างอิง (Switch Axis)

วิธีจะใช้หาทิศทางและขนาดของมุมที่ผิดพลาดที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งนั้นทำได้โดยการเลือกลำคลื่นที่ทำการสวิตซ์ระหว่างตำแหน่ง 2 ตำแหน่ง ตามรูปที่2.2 ซึ่งเรียกว่าการสลับพูคลื่น (Lobe Switching) หรือ การสร้างพูเป็นลำดับ



รูปที่ 2.2 แสดงรูปแบบของสายอากาศการสลับพูคลื่นและสัญญาณที่บอกความผิดพลาดใน 1มิติ

รูปที่ 2.2 (ก) แสดงลำคลื่นของสายอากาศ พิกัดเชิงขั้ว (Polar) ที่มีพูข้าง (Side Lobe) น้อยที่สุดในการสลับไป 2 ตำแหน่ง ส่วนรูปที่ 2.2 (ข) แสดงลำคลื่นของสายอากาศพิกัดเชิงสี่เหลี่ยม (Rectangular Coordinate) และในรูปที่ 2.2 (ค) แสดงสัญญาณบอกความผิดพลาดที่หาได้จากการที่เป้าหมายไม่อยู่บน

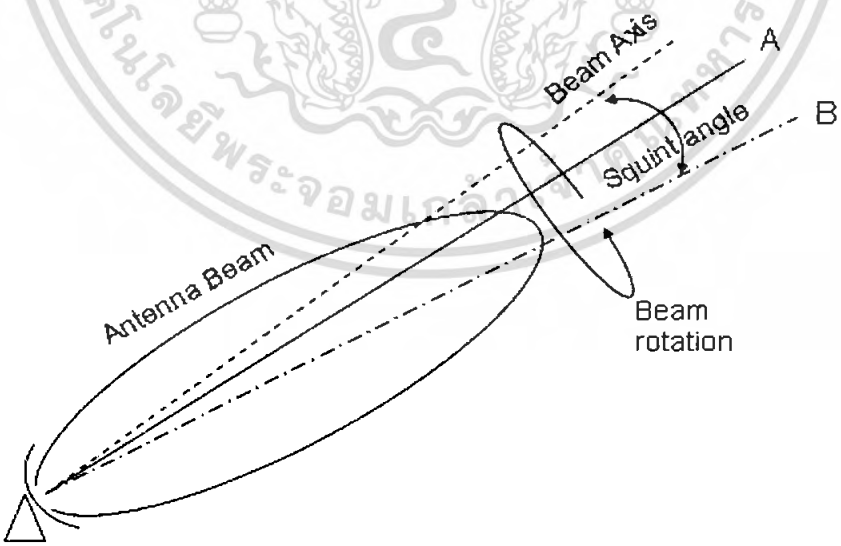
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศทางอ้างอิงความแตกต่างของขนาดศักดาไฟฟ้าของทั้ง 2 ตำแหน่งที่ทำการสลับคือมุมที่คลาดเคลื่อนไปจากเป้าหายอ้างอิงจากทิศอ้างอิง และเมื่อต้องการให้ตรงกับเป้าหมายจะต้องเคลื่อนที่สายอากาศไปจนกว่าศักดาไฟฟ้าของทั้ง 2 ตำแหน่งจะมีค่าเท่ากัน นั่นคือค่าของสัญญาณที่ผิดพลาดค่าของสัญญาณที่ผิดพลาดจะทีค่าเท่ากับศูนย์แล้วเป้าหมายก็จะอยู่บนแกนทิศทางอ้างอิง และตำแหน่งของเป้าหมายก็จะถูกหาได้ในที่สุด

2.1.2 วิธีการกวาดแบบกรวย (Conical Scan)

เป็นการติดตามแบบอัตโนมัติ ซึ่งสัญญาณผิดพลาดถูกตรวจจับโดยการหมุนของตัวแพร่คลื่นปฐมภูมิ (Primary Radiator) รอบๆแกนของตัวสะท้อน (Scan Axis) กับค่าคงที่ของการเปลี่ยนตำแหน่งจากจุดโฟกัส

หลักการของวิธีการกวาดแบบกรวย ตามภาพที่แสดงหลักการในรูปที่ 2.3 และบล๊อคไดอะแกรมในรูปที่ 2.4 เมื่อลำคลื่นของสายอากาศถูกหมุนไปรอบๆ แกนหมุนหลัก B ขนาดของสัญญาณที่ได้รับบนแกนของลำคลื่นคือ ระดับสัญญาณ A และระดับสัญญาณ B ดังรูปที่ 2.3 ถ้าเป้าหมาย ไม่ได้อยู่บนแกนหลัก จะพบว่าพลังงานที่ได้รับเมื่อ ตัวแพร่คลื่นอยู่ทางเดียวกับเป้าหมายจะมีค่ามากกว่าเมื่ออยู่ตรงกันข้ามดังนั้นสัญญาณที่บอกความผิดพลาด (Tracking Error) จะมอดูเลต (Modulation) สัญญาณที่ได้รับโดยการเปรียบเทียบกับอัตราการกวาด (Scan Rate) การมอดูเลตขั้นนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงซึ่งถูกสร้างการหมุนโครงสร้างทางกลไปในทิศทางของเป้าหมาย โดยขนาดของการมอดูเลตจะแปรผันตรงกับสัญญาณที่บอกความผิดพลาด และสัญญาณที่บอกความผิดพลาดนี้จะนำไปใช้เป็นตัวขยายแบบเซอร์โว (Servo Amplifier) เพื่อที่จะขับสายอากาศไปในทิศทางที่ต้องการนั่นคือทำให้ค่าความผิดพลาดเป็นศูนย์

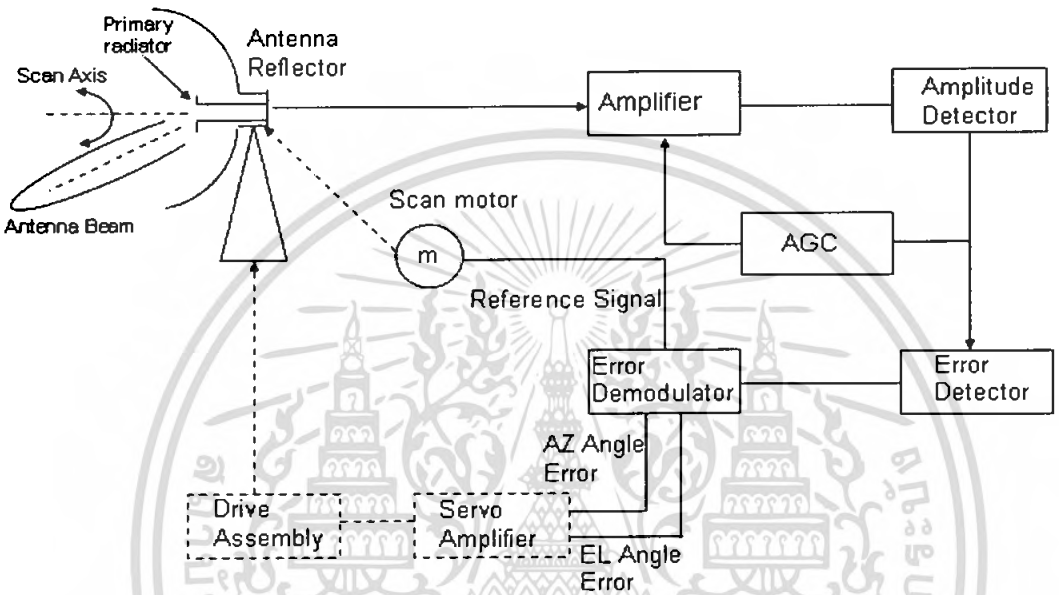


รูปที่ 2.3 การทำงานของวิธีกวาดแบบกรวย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเป้าหมายอยู่ในตำแหน่งของแกนหลัก ตัวแพร่กระจายคลื่นปฐมภูมิจะได้รับพลังงานเท่ากันในการหมุนทุกๆตำแหน่ง

พารามิเตอร์ (Parameter) หลักของสายแบบการกวาดแบบกรวยคือมุมเฉ (Squint Angle) ซึ่งเป็นมุมระหว่างแกนหมุนกับแกนของลำคลื่นของสายอากาศ (Antenna Beam) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ในการเลือกมุมเฉจะพิจารณาระหว่างการสูญเสียตัดข้าม (Crossover Loss) และการหมุนที่ผิดวิธีนี้ใช้กับเรดาห์ที่ใช้ติดตามสัญญาณขนาดเล็ก



รูปที่ 2.4 บล็อคไดอะแกรมของวิธีการกวาดแบบกรวย

2.1.3 ระบบติดตามแบบขั้น (Step Track System)

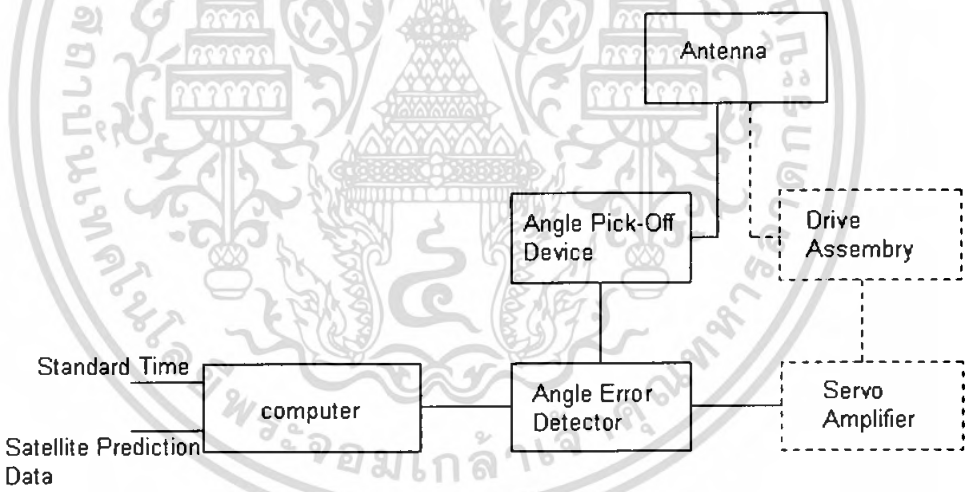
เป็นวิธีการค้นหาระดับสูงสุดของสัญญาณโดยการปรับตำแหน่งของสายอากาศแบบทีละขั้น และทำการเปรียบเทียบระดับสัญญาณที่ได้รับก่อนและหลังของแต่ละขั้น วิธีนี้เรียกว่า การไต่ระดับ (Hill Climbing) เป็นการอธิบายขบวนการของระดับสัญญาณสูงสุด สัญญาณที่ได้รับถูกตรวจจับโดยเครื่องรับสัญญาณ และดีซีเอาท์พุทจะถูกแปลงกลับเป็นข้อมูลแบบดิจิตอล โดยตัวแปลงอนาลอกเป็นดิจิตอลข้อมูลในรีจิสเตอร์ที่หนึ่ง คือ ระดับสัญญาณที่ถูกสุ่มตัวอย่างก่อน และข้อมูลในรีจิสเตอร์ที่สอง เป็นระดับสัญญาณที่ถูกสุ่มทีหลัง แล้วนำข้อมูลที่อยู่ในรีจิสเตอร์มาเปรียบเทียบกันเพื่อตรวจสอบว่าเพิ่มขึ้นหรือลดลง ขั้นตอนต่อไปก็จะกำหนดทิศทางโดยการพิจารณาค่าลอจิก แล้วกำหนดให้เป็นทิศทางเดียวกันกันสำหรับระดับที่เพิ่มขึ้น และทิศทางตรงกันข้ามสำหรับระดับที่ลดลงหรือเท่ากัน มุมผิดพลาดระหว่างค่ามุมที่อ่านได้จากสายอากาศ และค่ามุมที่ต้องการจะตรวจจับโดยอุปกรณ์ตรวจจับค่าความผิดพลาดของมุม (Angle-error Detector) และสายอากาศเบนไปยังตำแหน่งที่ต้องการโดยระบบควบคุมแบบป้อนกลับและจะทำซ้ำเช่นนี้ไปเรื่อยๆในแนวของอะซิมุทและอิเลเวชั่น เพื่อที่จะชี้ลำคลื่นของสายอากาศให้อยู่ในทิศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางตรงกับตำแหน่งของดาวเทียมการหมุนของสายอากาศจะหมุนไปข้างหน้าและถอยหลังอย่างช้าๆทีละขั้นในแนวแกนอะซิมุทและอิเลเวชั่นรอบๆตำแหน่งสูงสุดของลำคลื่นและสายอากาศจะหยุดตรงตำแหน่งสูงสุดโดยการตรวจจับการเคลื่อนที่นี้ การติดตามจะถูกทำซ้ำอีกครั้งหลังจากการกำหนดระยะห่างของการติดตามวิธีนี้ถูกพัฒนาสำหรับการติดตามสัญญาณของสถานีภาคพื้นดินที่มีจานสายอากาศขนาดเล็ก การติดตามชนิดนี้จะมีผลทำให้เกิดความผิดพลาดได้เนื่องจากการแกว่งไปมาของระดับสัญญาณที่ได้รับดังนั้นจึงได้มีการเอาค่าของการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณที่ได้มาเป็นตัวควบคุม เพื่อไม่ให้เกิดการผิดพลาด

2.1.4 ระบบการติดตามแบบใช้โปรแกรม (Program Track System)

ในระบบนี้จะทำการกำหนดตำแหน่งของสายอากาศในทิศทางของดาวเทียมโดยอาศัยข้อมูลจากวงโคจรที่ได้จากการทำนาย คอมพิวเตอร์จะทำการคำนวณค่าของมุมที่แตกต่างระหว่างมุมที่วัดจากสายอากาศจริงกับมุมที่ได้จากดาวเทียมบังคับการทันทีทันใด ซึ่งทำการตรวจจับโดยอุปกรณ์เข้ารหัสมุม (Angle Encoder) สัญญาณความผิดพลาดจะไปกระตุ้นตัวขยายแบบเซอร์โว ให้ขับสายอากาศโดยมีค่าความผิดพลาดเป็นศูนย์ รูปที่ 2.5 แสดงระบบติดตามแบบใช้โปรแกรม



รูปที่ 2.5 บล็อคไดอะแกรมของตัววิเคราะห์สัญญาณผิดพลาดสำหรับระบบติดตามแบบใช้โปรแกรม

วิธีนี้จะทำให้ได้ G/T สูง ความแน่นอนของการติดตามขึ้นอยู่กับความแน่นอนในการคำนวณวงโคจรและความแน่นอนในการชี้ตำแหน่งของสายอากาศเองด้วย ซึ่งนิยมใช้ในการติดตั้งและติดตามดาวเทียมแบบวงโคจรและยังใช้สำหรับการติดตามเป้าหมายที่ไม่สามารถติดตามสัญญาณที่ได้รับได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 ระบบติดตามเป้าหมายอัตโนมัติแบบโมโนพัลส์ (Monopulse tracking System)

ระบบติดตามเป้าหมายอัตโนมัติแบบโมโนพัลส์ คือ ระบบติดตามเป้าหมายโดยการหาตำแหน่งด้วยการวัดจากความสัมพันธ์ของเฟส หรือขนาด ซึ่งจะเรียกข้อมูลที่ได้รับนี้ว่า มุมที่มีความผิดพลาดไป (Angle Error) ซึ่งหาได้จากพัลส์ที่ สะท้อนกลับมาจากเป้าหมายเพียงพัลส์เดียว จึงเรียกได้ว่าโมโนพัลส์ เทคนิคนี้เรียกว่า การติดตามแบบโมโนพัลส์ ตั้งโดยห้องปฏิบัติการเบลเทเลโฟน (Bell Telephone Laboratory) ในปี 1946 อย่างไรก็ตามรู้จักกันมาแต่เดิมว่าคือ การหาทิศทางโดยใช้พูเหลี่ยม (Simultaneous Lobing) ซึ่งอาจจะเป็นคำอธิบายที่ดีกว่าและมันเป็นผลการทดลองในปี 1928 การติดตามแบบโมโนพัลส์สามารถทำได้โดยการใช้ข้อมูลทางขนาดของสัญญาณหรือเฟสของสัญญาณจากจานสายอากาศ หรือใช้ทั้งสองแบบ เพื่อให้ได้การคาดคะเนที่ดีกว่าวิธีการสร้างพูแบบเป็นลำดับและวิธีการกวาดแบบกรวย ประโยชน์ของเรดาห์แบบโมโนพัลส์ (Monopulse Radar) คือ ตามหลักการแล้วสามารถบอกตำแหน่งเป้าหมายได้จากการวัดพัลส์เพียงพัลส์เดียวซึ่งจะมีประโยชน์มาก เมื่อเรดาห์ถูกรบกวนจากสัญญาณอื่น และการกวาดเพียงครั้งเดียวก็สามารถรู้ตำแหน่งได้ การตรวจวัดค่ามุมของเป้าหมาย คือ กระบวนการหาทิศทางของเป้าหมายเป็นหน้าที่หลักของเรดาร์ (เครื่องหาวัตถุในระยะไกลโดยส่งวิทยุคลื่นสั้นให้สะท้อนกลับมา)

2.2 เทคนิคการวัดมุมผิดพลาดในระบบโมโนพัลส์

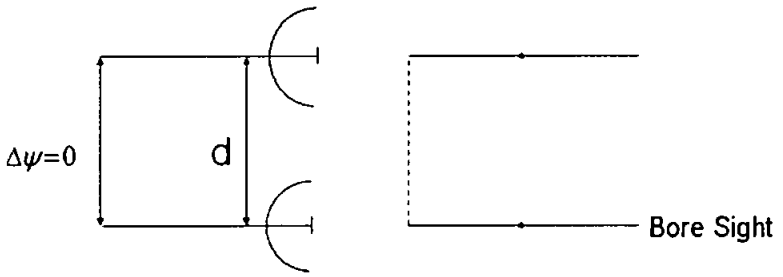
1. การเปรียบเทียบด้วยเฟส (Phase - Comparison)
2. การเปรียบเทียบด้วยขนาด (Amplitude - Comparison)
3. การเปรียบเทียบโดยใช้ทั้งขนาดและเฟส (Amplitude - Phase - Comparision)

โดยพิจารณาแต่ละวิธีดังนี้

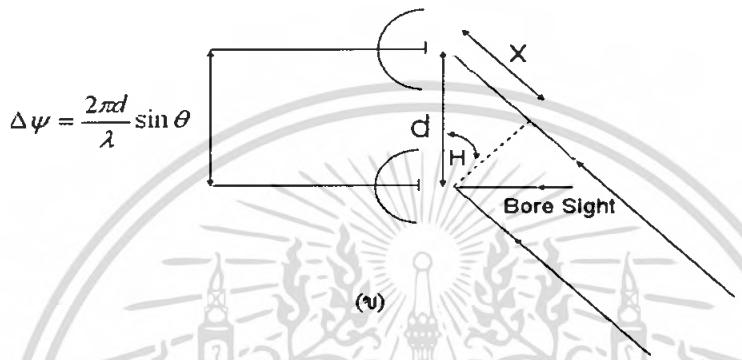
2.2.1 การเปรียบเทียบด้วยเฟส

จะใช้สายอากาศรับสัญญาณมาวางติดกัน และแต่ละอันต้องขนานกันด้วย โดยการเปรียบเทียบความต่างเฟสของทั้งสองเอาต์พุทเพื่อนำมาเป็นข้อมูลของมุมที่ผิดพลาดไปสัญญาณสะท้อนกลับมาในแนวแกนกลางของจานสายอากาศ สัญญาณทั้งสองจะมาถึงพร้อมๆกันตามรูปที่ 2.6 (ก) แต่ถ้าสัญญาณสะท้อนกลับมาทำมุม θ กับแนวแกนกลางของจานสายอากาศ สัญญาณจะมาถึงสายอากาศอันหนึ่งช้ากว่าอีกอันหนึ่ง เพราะมันมีการเดินทางมากกว่าเป็นระยะทาง x โดยที่ $x = d \sin \theta$ ตามรูปที่ 2.6 (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

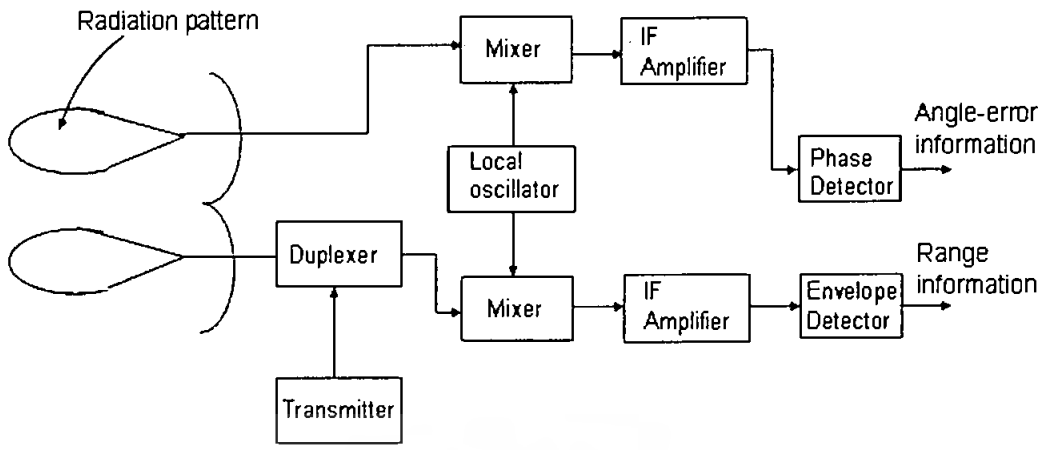
รูปที่ 2.6 การเปรียบเทียบด้วยเฟส

เมื่อ d คือ ระยะห่างของสายอากาศ มีหน่วยเป็นเมตร แล้วระยะ X จะถูกแสดงในรูปของเศษส่วนของความยาวคลื่นเรดาร์ (λ) กับความต่างเฟส (ΔΨ) = ระหว่างสัญญาณทั้งสองเป็นดังนี้

$$\Delta\psi = \frac{2\pi d}{\lambda}\sin\theta \text{ (radians)} \qquad (2.1)$$

ขนาดของสัญญาณที่สะท้อนกลับมาจากเป้าหมายจะทีค่าเท่ากัน แต่เฟสจะต่างกัน และความแตกต่างเฟสนี้สามารถวัดได้ด้วยเฟสชิฟเตอร์ (Phase Shifter) แล้วเซอร์โวลูป (servo loop) จะจัดการกับเอาต์พุทของเฟสชิฟเตอร์จนกระทั่งความต่างเฟสมีค่าเท่ากับศูนย์ จำนวนของการชิฟเฟสที่ต้องทำให้ความต่างเฟสมีค่าเป็นศูนย์นี้ก็คือการวัดค่าของมุมที่ผิดพลาดไปนั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

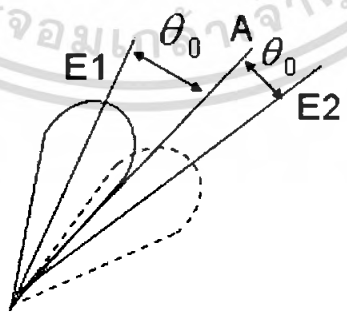


รูปที่ 2.7 บล๊อคไดอะแกรมของการเปรียบเทียบด้วยเฟส

ประโยชน์ที่ได้จากวิธีนี้มีค่อนข้างมีข้อจำกัด เพราะจะมีปัญหาเกี่ยวข้องกับความคลุมเครือของตำแหน่งของมุมที่เรียกว่า เกรทติ้งโลบ (Grating Lobe) ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อนำสายอากาศที่มีช่องว่างๆ 2 ช่อง มาใช้ แต่ก็สามารถแก้ปัญหาได้โดยการใช้สายอากาศหลายๆตัว (Phase Antenna Array)

2.2.2 การเปรียบเทียบด้วยขนาด

ในการใช้การตรวจสอบวัดค่ามุมโดยการเปรียบเทียบด้วยขนาด (Amplitude-Comparison Angle) จะประกอบด้วยการพิจารณารูปแบบลำคลื่นของสายอากาศที่เหลื่อมกันเล็กน้อย (Overlapping) และมีขนาดที่เท่ากัน โดยที่มุม θ_0 จากแกนสมมาตร (Equisignal Axis : แกนที่ลากตามยาวที่ตัดจุดที่ทำให้ขนาดของทั้งสองลำคลื่นมีค่าเท่ากัน) ดังแสดงตามรูปที่ 2.8

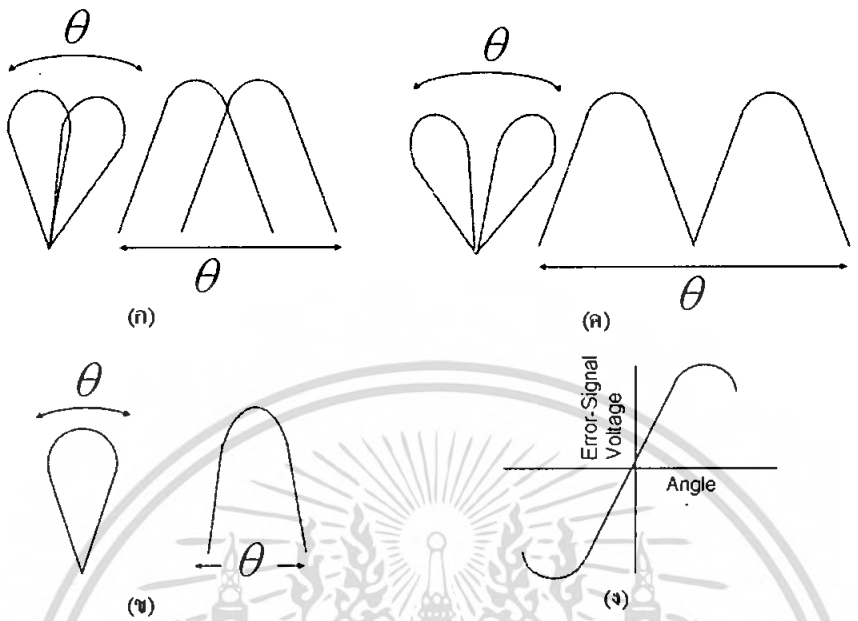


รูปที่ 2.8 การเปรียบเทียบด้วยขนาด

จากรูปที่ 2.8 เป้าหมาย A จะทำมุมห่างจากแกนสมมาตรเป็นมุม θ พบว่าสัญญาณที่ได้รับในลำคลื่นที่ 1 (E1) จะมีขนาดต่ำกว่าลำคลื่นที่ 2 ซึ่งขนาดที่ต่างกันของสองลำคลื่นนี้ จะเป็นตัวกำหนดขนาด

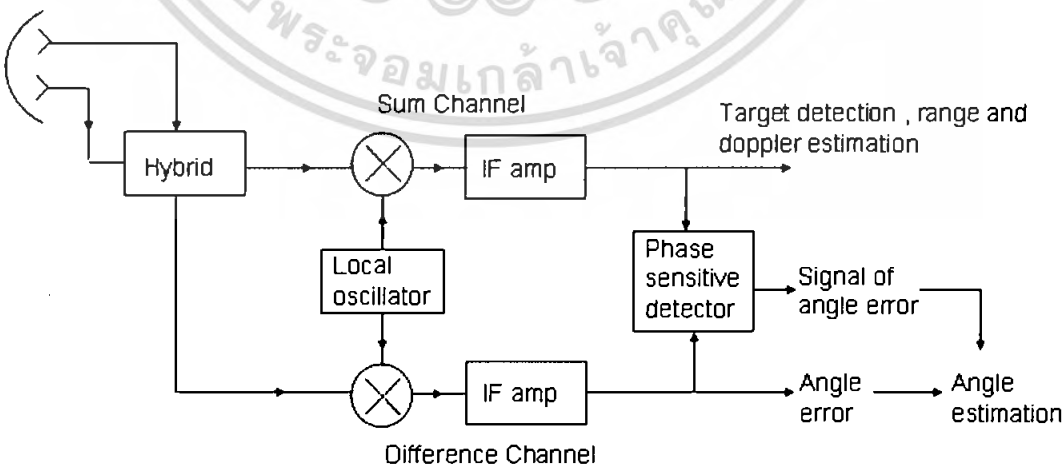
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของมุมออฟเซ็ตจากแกนสมมาตรกับเป้าหมาย เครื่องหมายของผลต่างจะแสดงถึงทิศทางของเป้าหมายในการวัดระบบพิกัด เช่น ขึ้น ลง จากแกนในกรณีของอิเลเวชั่น



รูปที่ 2.9 แสดงรูปแบบของสายอากาศที่ใช้ในการเปรียบเทียบด้วยขนาด

สองลำคลื่นจากจานสายอากาศถูกต่อเข้าที่ไฮบริดซึ่งจะให้สัญญาณผลรวมของกำลังคลื่นทั้งสองคลื่นดังแสดงในรูป 2.9 (ข) และสัญญาณผลต่างดังรูปที่ 2.9 (ค) โดยมีรูปแบบของสายอากาศใช้รับสัญญาณตามภาพที่ 2.9 (ก) สัญญาณเหล่านี้จะป้อนให้กับเครื่องรับทั้งสองที่แมตช์กันเพื่อที่จะนำสัญญาณมามิช์กันให้กลายเป็นความถี่ต่ำลงแล้วนำไปขยายด้วยดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 บล็อคไดอะแกรมของระบบโมโนพัลส์ที่ใช้การเปรียบเทียบด้วยขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำคลื่นผลรวมใช้สำหรับการตรวจวัดเป้าหมายและเพื่อวัดข้อมูลทางระยะทาง อัตราการของผลรวมลำคลื่นซึ่งมีทิศทางตรงกับเป้าหมายจะให้อัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนมากกว่าเป้าหมายที่ในแนวแกนกลางของจานสายอากาศ (Boresight) อย่างไรก็ตามลำคลื่นผลรวมจะกว้างกว่าลำของสัญญาณแต่ละตัว ดังนั้นจะไม่ใช้วัดมุม

สำหรับทางด้านของผลต่างก็คือ ศักดาไฟฟ้าที่เกิดจากความผิดพลาด (error voltage) ซึ่งเป็นสัญญาณอย่างคร่าวๆกับมุมที่เบี่ยงเบนไปจากเป้าหมายในแนวแกนกลางของจานสายอากาศ และไม่มีเอาต์พุทเมื่อขนาดของสัญญาณทั้งสองที่สะท้อนกลับมาเท่ากัน การจางหายของสัญญาณสะท้อนกลับมาสามารถเกิดขึ้นเท่าๆกันในทั้ง 2 ลำคลื่นของสายอากาศซึ่งมันจะไม่มีผลต่อการเปรียบเทียบนี้ นอกจากจะมีอัตราของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนต่ำๆดังนั้นจึงใช้สัญญาณทางด้านผลต่างมาหามุมที่ผิดพลาด

ตัวตรวจจับเฟส (Phase sensitive detector) ตามรูปที่ 2.10 ใช้หาค่าศักดาไฟฟ้าที่เกิดจากความพลาดที่จะนำมาใช้บอกมอเตอร์แบบเซอร์โว (Servo motor) ให้ไปขับเคลื่อนสายอากาศให้ไปยังทิศทางตรงกับตำแหน่งของเป้าหมาย

2.3 ทฤษฎีเบื้องต้นของสายอากาศเฮลิคอล

สายอากาศเฮลิคอลโมหดแนวแกนเป็นสายอากาศที่ให้คลื่นที่มีการโพราไรเซชั่นแบบวงกลมในทิศแนวแกน และมีแบนวิดท์กว้าง จึงมีใช้งานสื่อสารทั่วไป และเป็นสายอากาศแบบโพราไรเซชั่นวงกลมแบบหนึ่งที่ใช้เป็นสายอากาศติดต่อกับจรวดและยานอวกาศอย่างแร่หลาย

2.3.1 โครงสร้างของสายอากาศเฮลิคอล

สายอากาศเฮลิกส์ที่ใช้กันโดยทั่วไปจะมีรูปร่างดังแสดงในรูปที่ 2.11 กล่าวคือ ประกอบด้วยขดลวดรูปเกลียว ซึ่งทำหน้าที่กระจายคลื่น และแผ่นสะท้อน การป้อนเพาเวอร์นั้นจะป้อนจากสายโคแอกเชียลจากทางด้านหลังของแผ่นสะท้อนโดยให้โลหะในต่อกับขดลวดรูปเกลียว และโลหะนอกต่ออยู่กับตัวแผ่นสะท้อน

สำหรับโครงสร้างรายละเอียดของขดลวดรูปเฮลิคอลนั้นจะประกอบด้วยตัวแปรต่างๆดังต่อไปนี้

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางขดลวด ของสายอากาศเฮลิคอล

C คือ ความยาวเส้นรอบวงขดลวดของสายอากาศเอลิคอล

S คือ ระยะห่างระหว่างขดลวดของสายอากาศเฮลิคอล

α คือ มุมพิตช์ (Pitch angle)

L คือ ความยาวขดลวดหนึ่งรอบ

n คือ จำนวนรอบขดลวด

A คือ ความยาวตามแนวแกนของขดลวด

a คือ รัศมีของขดลวดตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

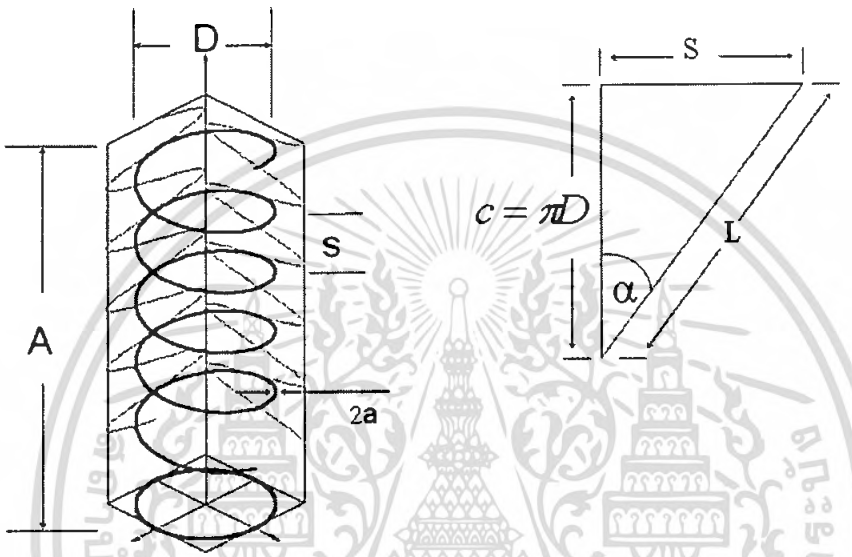
ตัวแปรต่างเหล่านี้จะสัมพันธ์กันดังนี้คือ

$$c = \pi D \tag{2.2}$$

$$\alpha = \tan^{-1}\{\frac{S}{\pi D}\} \tag{2.3}$$

$$L = \sqrt{\{S^2 + (\pi D)^2\}} \tag{2.4}$$

$$A = nS \tag{2.5}$$

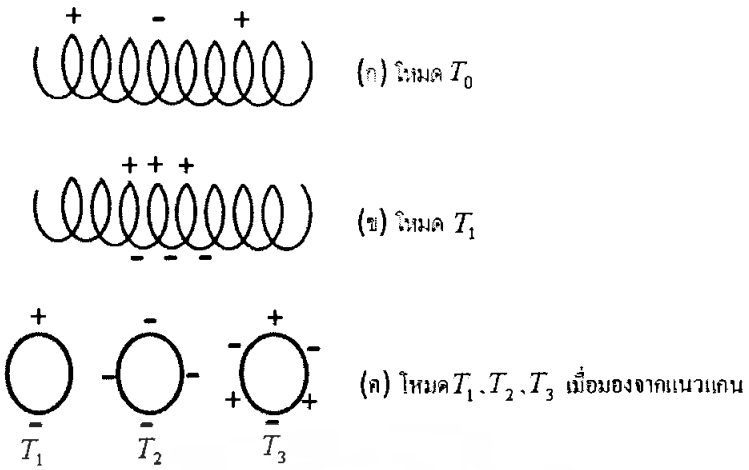


รูปที่ 2.11 โครงสร้างของสายอากาศเฮลิคอล

2.3.2 โหมดของกระแสบนสายอากาศเฮลิคอล

เมื่อพิจารณาโหมดของกระแสที่ไหลบนโครงสร้างของเฮลิคอล จากผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎี พบว่ากระแสจะไหลได้หลายโหมดดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.12 โดยที่เครื่องหมาย + และ - แสดงเครื่องหมายของประจุไฟฟ้าชั่วขณะที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งนั้นๆโหมด T_0 เป็นโหมดต่ำสุดซึ่งจะมีบทบาทมากในกรณีที่ L สั้นกว่าความยาวคลื่นมากๆ ในกรณีที่ $nL << \lambda$ โหมดนี้จะเป็นโหมดหลักที่ทำให้เกิดการกระจายคลื่นออกไป การกระจายคลื่นในโหมดนี้จะคล้ายคลึงกับการกระจายคลื่นออกจากสายอากาศลูปขนาดเล็ก ซึ่งคลื่นที่กระจายออกไปนั้นจะออกไปในระนาบตั้งฉากกับแกนของเฮลิคอล จึงทำให้มีชื่อเรียกเป็นสายอากาศเฮลิกคอลโหมดตั้งฉาก (Normal mode helical antenna) เนื่องจากสายอากาศโหมดตั้งฉากนี้เป็นสายอากาศที่มีแบนด์วิดท์แคบจึงไม่กล่าวถึงรายละเอียดในที่นี้ อย่างไรก็ตามจากรูปที่กะทัดรัดทำให้สายอากาศนี้มีใช้ในงานวิทยุสื่อสารที่ไม่ต้องการแบนด์วิดท์กว้าง

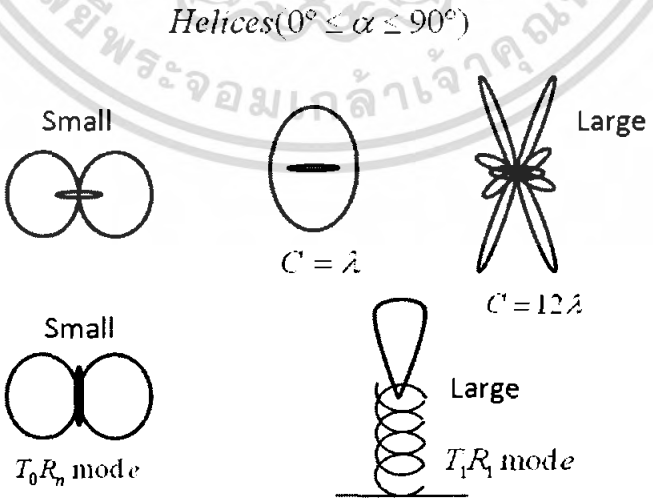
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ประจุไฟฟ้าชั่วขณะที่เกิดขึ้นบนสายอากาศเฮลิคอลโหมดต่างๆ

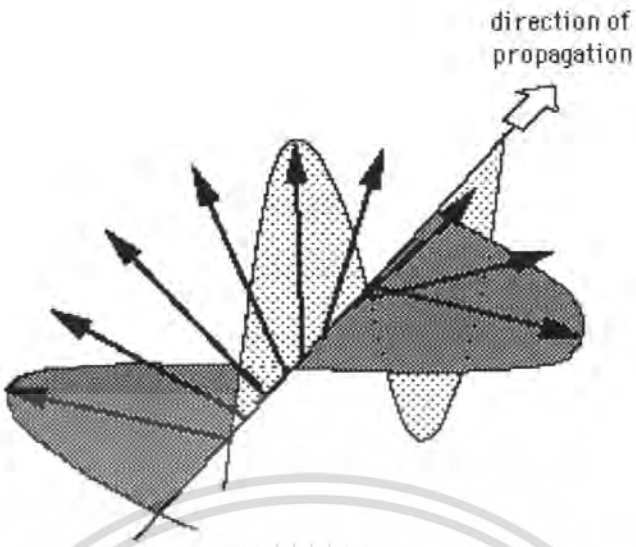
โหมด T_1 เป็นโหมดหลักในกรณีที่ C มีค่าประมาณหนึ่งความยาวคลื่น และถ้าโครงสร้างของขดลวดมีมุมพิตช์แคบก็จะทำให้กระแสชั่วขณะมีการกระจายดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.12 (ก) และ 2.12(ข) กล่าวคือกระแสชั่วขณะที่มีเฟสเป็นบวกและมีเฟสเป็นลบจะอยู่ห่างกันครึ่งรอบหรืออยู่ฝั่งตรงข้ามของเส้นผ่านศูนย์กลางกระแสโหมดนี้จะทำให้เกิดการกระจายคลื่นออกไปในทิศแนวแกนและมีแบนด์วิดท์กว้าง สายอากาศเฮลิคอลที่มีโหมด T_1 เป็นหลักนี้เรียกว่า สายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน (Axial mode helical antenna)

สำหรับโหมด T_2 และ T_3 และโหมดที่สูงกว่านี้นั้นจะเกิดเมื่อ C มีขนาดยาวกว่าความยาวคลื่น รูปที่ 2.12 (ค) นั้นแสดงค่าประจุชั่วขณะของกรณีที่มุมพิตช์แคบ การกระจายคลื่นจากดหมดนี้จะออกไปหลายทิศทาง และทิศทางของเมนบีมก็จะเปลี่ยนไปตามความถี่มาก ดังนั้นจึงไม่ค่อยมีใช้ในแง่ของสายอากาศ



รูปที่ 2.13 รูปแสดงแพทเทิร์นสายอากาศเฮลิคอลทั้งสองโหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



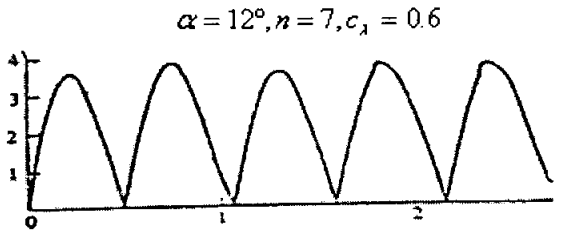
รูปที่ 2.14 รูปแสดงการโพลาไรเซชั่น (Polarization)

2.3.3 คุณสมบัติของสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน

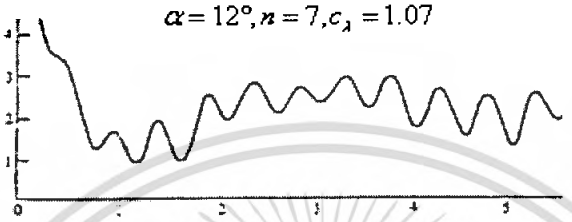
สายอากาศโหมดแนวแกนนี้สายมารถเป็นสายอากาศที่ให้คลื่นที่มีโพราไรเซชั่นแบบวงกลมในทิศแนวแกน และมีแบนด์วิดท์กว้าง จึงทำมีการใช้งานสื่อสารทั่วไป และเป็นสายอากาศแบบโพราไรเซชั่นวงกลมแบบหนึ่งที่ใช้เป็นสายอากาศติดต่อกับจรวดและยานอวกาศอย่างแพร่หลาย

โหมดของกระแสที่ไหลบนสายอากาศเฮลิคอลขนาดต่างๆที่กล่าวมาในข้างต้นนั้น ได้มีผู้ทำการทดลองวัดขนาดจริงๆของกระแสที่ไหลบนสายอากาศเฮลิคอล ซึ่งตัวอย่างของผลการวัดได้แสดงไว้ดังรูปที่ 2.15 ในกรณีของรูปนั้นเป็นกรณีของ $C = 0.6\lambda$ จะเห็นได้ว่าขนาดของกระแสที่ตำแหน่งต่างๆบนเส้นลวดจะอยู่ในรูปคลื่นยืนที่ปลายสายเปิดสายเปิดวงจรอยู่สำหรับรูปนั้นเป็นกรณีที่ $C = 1.07\lambda$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าขนาดของกระแสไหลตามในรูปนั้น จะสามารถอธิบายได้โดยรูปที่ 2.15 (ก) กว่าคือในช่วงที่ C มีขนาดประมาณ 0.6λ หรือเล็กกว่านี้ โหมดของกระแสที่ไหลจะเป็น T_0 เป็นหลัก และกระแสโหมด T_0 คลื่นจรออกจากจุดป้อนแล้วไปสะท้อนที่ปลายเส้นลวด จึงทำให้เกิดคลื่นยืนตามที่เห็นในรูปที่ 2.15 (ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

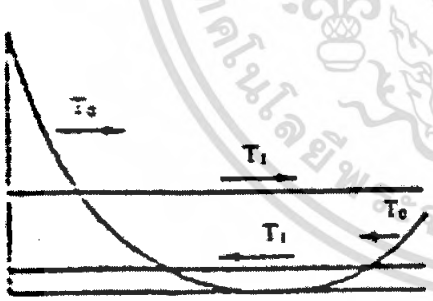


(ก) กรณีที่มีกระแสโหมด T_0 เป็นหลัก



(ข) กรณีที่มีกระแสโหมด T_1 เป็นหลัก

(ค) กระแสคลื่นจรของกระแสในโหมด T_0



(ง) กระแสคลื่นจรของกระแสในโหมด T_1

(จ) กระแสรวมของกรณีในโหมด T_1

รูปที่ 2.15 ลักษณะการไหลของกระแสบนสายอากาศเฮลิคอลขนาดต่างๆ

สำหรับกรณีของรูปนั้นจะอธิบายได้โดยใช้รูปที่ 2.15(ง) และรูปที่ 2.15(จ) ดังนี้คือ ในกรณีที่ C มีขนาดประมาณหนึ่งความยาวคลื่น โหมดของกระแสที่เกิดขึ้นได้มี 2 โหมดด้วยกัน คือ T_0 และ T_1 โหมด T_0 นั้นเป็นโหมดที่ไม่สามารถที่จะส่งผ่านไปตามโครงสร้างได้ จึงมีขนาดใหญ่บริเวณจุดป้อน สำหรับโหมด T_1 นั้นจะเป็นโหมดที่สามารถส่งผ่านไปตามโครงสร้างได้ และคลื่นจรของโหมดนี้ที่ออกจากจุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ป้อนก็จะมีขนาดคงที่ตลอดความยาวของเส้นลวด เมื่อพิจารณาที่ปลายสายคลื่นจรโหมด T_1 เมื่อพบกับปลายสายที่เปิดวงจรอยู่ก็จะเกิดการสะท้อนโดยการสะท้อนนี้จะมีโหมด T_0 และ T_1 ถูกกระตุ้นให้เกิดพร้อมกัน และเช่นเดียวกับที่จุดป้อน T_0 ที่สะท้อนกลับมานี้นั้นจะเล็กลงอย่างรวดเร็วตามระยะทางจากปลายสาย ในขณะที่โหมด T_1 จะส่งผ่านเป็นคลื่นจรกลับมาทางจุดป้อน เนื่องจากโหมด T_0 และโหมด T_1 ขาไปเข้าด้วยกันจะเป็นรูปกราฟดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 2.15(จ) กล่าวคือบริเวณที่มีค่ากระแสเล็กลงเกือบเป็นศูนย์ ซึ่งเนื่องจากเฟสของกระแสทั้งสองตรงข้ามกันในขณะที่ขนาดของกระแสเท่ากันลักษณะดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นกับกระแสที่สะท้อนกลับมาเช่นเดียวกันเนื่องจากกระแสโหมด T_1 ที่สะท้อนกลับมามีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับขาไป จึงทำให้คลื่นยืนที่เกิดขึ้นตรงกลางของขดลวดมีขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอดังจะเห็นได้จากการวัดผลในรูปที่ 2.15(ข) ตามคำอธิบายข้างต้นจะเห็นได้ว่าความยาวของเส้นลวดเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นจะต้องมากเพียงพอจึงจะทำให้เกิดกระแสบริเวณกลางของขดลวดมีค่าสม่ำเสมอดังในรูปที่ 2.15 (ข) และจากการทดลองพบว่าช่องของค่า C และมุม α ที่ทำให้ได้กระแสใกล้เคียงกับรูปที่ 2.15(ข) นั้นคือ $3/4 \le c/\lambda \le 4/3$ และ $12° \le \alpha \le 15°$

เมื่อทำการพิจารณาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์จากรูปร่างของกระแสในรูปที่ 2.13 จะพิจารณาลักษณะเฉพาะของอินพุทอิมพีแดนซ์ของกรณี c/λ มีขนาดเล็กกว่า 2/3 และกรณีที่ $3/4 \le c/\lambda \le 4/3$ ได้ดังนี้คือตามรูปที่ 2.15(ก) เมื่อความถี่เปลี่ยนไปความยาวของเส้นลวดเมื่อเทียบกับ λ จะเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งจะทำให้กระแสของคลื่นยืนที่ปรากฏที่ช่วงอินพุทที่เปลี่ยนไป ผลก็คือทำให้อินพุทอิมพีแดนซ์เปลี่ยนแปลงไป และการเปลี่ยนแปลงนี้ค่อนข้างมากซึ่งส่งผลทำให้แบนด์วิดท์ในเชิงของอินพุทอิมพีแดนซ์มีขนาดแคบ

สำหรับในกรณี $3/4 \le c/\lambda \le 4/3$ นั้นจากรูปที่ 2.15 (จ) จะเห็นได้ว่าที่ขั้วอินพุทกระแสขาไปกับกระแสที่สะท้อนกลับมามีขนาดต่างกันมาก ทำให้ผลกระทบจากการสะท้อนของกระแสตามความถี่มีค่าน้อยด้วย ดังนั้นสายอากาศในเงื่อนไขดังกล่าวนี้จึงมีแบนด์วิดท์ในเชิงของอินพุทอิมพีแดนซ์กว้าง

2.3.4 การกระจายคลื่นจากสายอากาศเฮลิคอลในโหมดแนวแกน

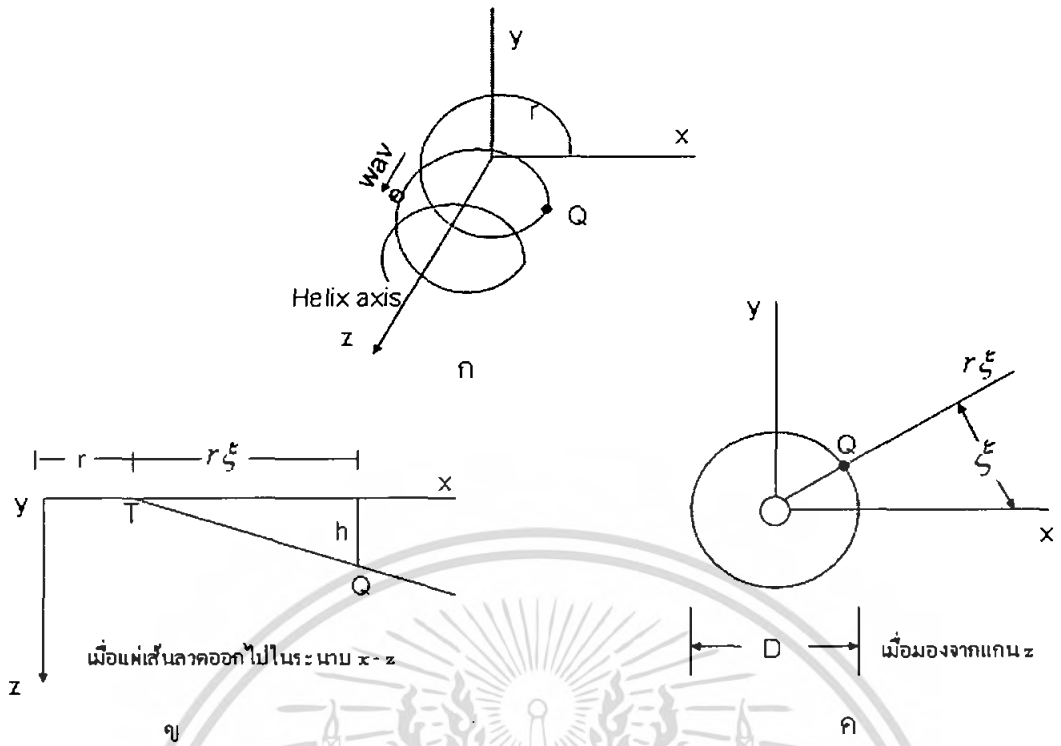
การคิดการกระจายคลื่นจากสายอากาศ โหมดแนวแกนนั้นจะทำได้โดยการใช้วิธีการประมาณค่ากระแสให้อยู่ในรูปคลื่นจร และใช้ความเร็วเฟสของกระแส ถ้าให้สายอากาศเฮลิคอลวางตัวอยู่ในรูปที่ 2.16(ก) เมื่อกางเส้นลวดออกไปแล้วในระนาบ x-z จะได้เป็นรูปที่ (ข) ส่วนรูปที่ (ค) แสดงรูปสายอากาศที่มองจากแกน z ตรงจุด Q ตามรูป (ค) นี้ ตำแหน่งจุด Q บนเส้นลวดอาจจะแสดงได้โดยใช้ระบบแกนประมานทรงกระบอกเป็น $(r\xi, z)$ ถ้าให้ ℓ เป็นระยะทางตามเส้นลวดจากจุดต้นทาง T ถึงจุด Q จะได้ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของตัวแปรต่างๆในรูปต่อไปนี้

$$h = \ell \sin\alpha \tag{2.6}$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{S}{\pi D}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{r\xi}{\ell}\right) \tag{2.7}$$

$$r\xi = \ell \cos\alpha \tag{2.8}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 โครงสร้างสายอากาศเฮลิคอลกับการคิดระยะทางไปยังจุดสังเกต

เพื่อความสะดวกในการคำนวณจะขอพิจารณาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเฉพาะจุดที่ห่างไกลบนแกน z ละให้ระยะทางจากจุดอ้างอิงถึงจุดสังเกตเป็น Zp จะพบว่าระยะทางจากจุด Q ถึงจุดสังเกตเป็นดังนี้คือ

$$Zp - h = Zp - \ell \sin\alpha \tag{2.9}$$

และกระแสที่ไหลตรงตำแหน่ง Q จะเขียนได้ดังนี้คือ

$$I(r,\xi,z) = I_0 e^{-j\frac{2\pi}{\lambda p}\ell} \tag{2.10}$$

โดยที่ I_0 เป็นขนาดของกระแสคลื่นจร จากสมการ 2 สมการข้างบน จะสามารถคำนวณหาสนามไฟฟ้า E_θ และ E_ϕ ในรูปต่อไปนี้

$$E_\theta = j30kI_0 \cos\alpha \frac{e^{jkZ_p}}{Z_p} \int_0^{2\pi\theta} \cos\xi e^{jk\lambda(\sin-\frac{1}{p})} d\xi \tag{2.11}$$

$$E_\phi = j30kI_0 \cos\alpha \frac{e^{jkZ_p}}{Z_p} \int_0^{2\pi\phi} \sin\xi e^{jk\lambda(\sin-\frac{1}{p})} d\xi \tag{2.12}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
82952

จากสมการที่ 2.8 ทำให้สามารถเขียน $k\ell(\sin\alpha - \frac{1}{p})$ ได้ในรูปแบบดังต่อไปนี้

$$k\ell(\sin\alpha - \frac{1}{p}) = kr\xi(\tan\alpha - \frac{1}{p\cos\alpha}) \tag{2.13}$$

เมื่อทำการแทนค่าสมการด้านบนลงไปในสมการของ E_θ และ E_ϕ และทำการอินทิเกรทจะทำให้ได้สมการใหม่ดังต่อไปนี้

$$E_\phi = j30kI_0\cos\alpha\frac{e^{jkZ_p}}{z_p}\bullet\frac{k'(e^{jk'2\pi n}-1)}{(k'-1)} \tag{2.14}$$

$$E_\phi = j30kI_0\cos\alpha\frac{e^{jkZ_p}}{z_p}\bullet\frac{(e^{jk'2\pi n}-1)}{(k'^2-1)} \tag{2.15}$$

โดยที่

$$k' = kr(\tan\alpha - \frac{1}{p\cos\alpha}) = \frac{L}{\lambda}(\sin - \frac{1}{p}) \tag{2.16}$$

เมื่อนำ E_ϕ มาหารด้วย E_θ เพื่อหาอัตราส่วนระหว่างโพลาไรเซชั่นในแกนหลัก (Axial ratio ย่อว่า AR) จะได้ผลลัพธ์ดังนี้คือ

$$AR = \left|\frac{E\phi}{E\theta}\right| = \left|\frac{j}{k'}\right| = \frac{1}{|k'|} \tag{2.17}$$

จากสมการข้างบนจะเห็นได้ว่า ถ้า $|k'|=1$ จะได้โพลาไรเซชั่นแบบวงกลม ซึ่งจะเป็นแบบหมุนซ้ายหรือหมุนขวานั้นจะขึ้นอยู่กับเครื่องหมายของ k' เมื่อพิจารณาว่าในช่วงที่ $3/4 \le c/\lambda \le 4/3$ ค่า p จะน้อยกว่า 1 ดังนั้น k' ควรจะมีเครื่องหมายลบ ซึ่งจะได้โพลาไรเซชั่นวงกลมแบบหมุนขวา เงื่อนไขของโพลาไรเซชั่นแบบวงกลมนี้จะแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่าง p กับ L และ S ได้โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$\frac{L}{\lambda}(\sin\alpha - \frac{1}{p}) = 1 \tag{2.18}$$

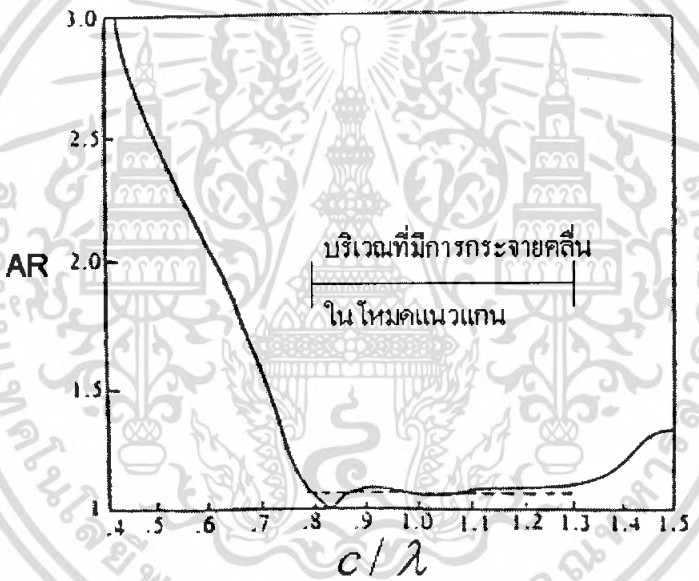
$$p = \frac{L}{L\sin\alpha + \lambda} = \frac{L}{S+\lambda} \tag{2.19}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สายอากาศเฮลิคอลที่มี c/λ ประมาณ 1 จะสร้างคลื่นในแนวแกนที่มีโพลาไรเซชั่นเป็นวงกลมหรือใกล้เคียงกับวงกลม โดยให้ค่า AR อยู่ที่ระหว่าง 1 ถึง ∞ กล่าวคือถ้า $|E_\theta| > |E_\phi|$ ก็จะเป็นผลคำนวณของ AR ในรูปต่อไปนี้

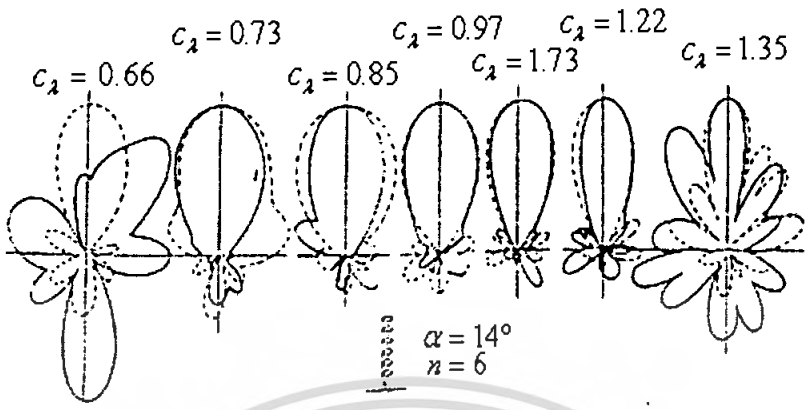
$$AR = \left|\frac{E_\theta}{E_\phi}\right| = |k'| \tag{2.20}$$

ผลการคำนวณในรูปที่ 2.15เป็นกรณีของสายอากาศมีโครงสร้างเป็น $\alpha = 13°$ และ n เป็น 7 รอบ และใช้ค่า p ที่ได้จากการวัดในการคำนวณ จากรูปจะเห็นได้ว่าที่ค่า $c/\lambda = 0.83$ จะได้ค่า AR เป็น 1 และในช่วงที่ c/λ มีค่าอยู่ระหว่าง 3 / 4 ถึง 4 / 3 ค่า AR จะต่ำกว่า 1.2



รูปที่ 2.17 ค่าอัตราส่วนของการโพลาไรเซชั่นในแกนหลักของสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 ลักษณะแพทเทิร์นของสายอากาศเฮลิคอลที่ c_λ ต่างๆ

รูป 2.19 ลักษณะแพทเทิร์นสายอากาศเฮลิคอลที่จำนวนรอบ (n) ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

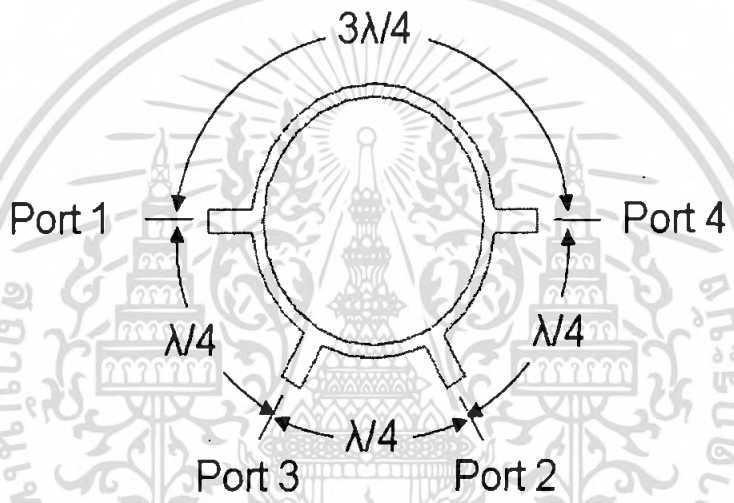
2.4 ภาควิเคราะห์สัญญาณ

2.4.1 ตัวเปรียบเทียบ (Comparator)

ในระบบติดตามอัตโนมัติแบบโมโนพัลล์จะใช้อุปกรณ์ไมโครเวฟแบบพาสซีฟ (Passive Microwave) ในการแยกสัญญาณผลต่าง กับสัญญาณผลรวม เรียกว่า ตัวเปรียบเทียบแบบโมนพัลส์ (Monopulse Comparator) ซึ่งโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นอุปกรณ์ 4 พอร์ท (Port) ซึ่งมีอินพุท 2 ทาง และเอาต์พุท 2 ทาง เอาต์พุททางด้านหนึ่งจะเป็นผลรวมของศักดาไฟฟ้า ส่วนอีกด้านจะเป็นผลต่างของศักดาไฟฟ้า ในโครงงานนี้เลือกใช้ไฮบริดริง (Hybrid Ring Junction) มาเป็นตัวเปรียบเทียบสัญญาณ

ไฮบริดริง (Hybrid Ring Junction)หรือ (Rat-Race)

ไฮบริดริง เรียกว่าไฮบริดแบบวงกลม (Circular Hybrid หรือ Rat-Race) ดังแสดงในรูปที่2.20



รูปที่ 2.20 ไฮบริดริง หรือ ไฮบริดแบบวงกลม

2.4.2 หลักการทำงานของไฮบริดริง

เมื่อมีสัญญาณอินพุทที่พอร์ท 1 สัญญาณคลื่นจะเดินทางไปพอร์ทที่ 4 สามารถเดินทางได้ 2 เส้นทาง แต่ละเส้นทางมีความยาว 3λ/4 เท่ากัน สัญญาณที่แยกออกเป็น 2 ทางจะไปทำการเพิ่มกำลังงานที่พอร์ทที่ 4 เป็นสัญญาณเอาต์พุท เมื่อมีสัญญาณอินพุทที่พอร์ท 1 สัญญาณคลื่นจะเดินทางไปพอร์ทที่ 3 สามารถเดินทางได้ 2 เส้นทาง ที่มีความยาว 5λ/4 และ λ/4 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างเท่ากับ λ ดังนั้น จึงไปทำการเพิ่มกำลังงานที่พอร์ตที่ 3 เช่นกัน เมื่อมีสัญญาณอินพุทที่พอร์ท 1 สัญญาณคลื่นจะเดินทางไปพอร์ทที่ 2 สามารถเดินทางได้ 2 เส้นทาง ที่มีความยาว λ และ λ /2 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างเท่ากับ λ /2 คือจะทำให้พลังงานมีเฟสตรงข้ามกัน ดังนั้นจึงทำให้ไม่มีเอาต์พุทออกที่พอร์ทที่ 2 ถ้ามีสัญญาณ 2 สัญญาณที่มีเฟสเหมือนกันเป็นอินพุทของพอร์ทที่ 1 และพอร์ทที่ 2 จะพบว่าพอร์ทที่ 3 เป็นผลรวมของสัญญาณทั้งสอง และพอร์ทที่ 4 จะเป็นผลต่างของสัญญาณทั้งสอง โดยที่อินพุทกับเอาต์พุทสามารถสลับกันได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้ากำหนดให้ v_1 และ v_2 เป็นศักดาไฟฟ้าขาเข้า (Input Voltage) ที่ด้านพอร์ต 1 และพอร์ต 2 ตามลำดับ แล้วศักดาไฟฟ้าขอออก (output Voltage) ที่ พอร์ตที่ 3 และพอร์ตที่ 4 จะเป็นผลรวมและผลต่างตามลำดับดังสมการต่อไปนี้

$$v_3 = \frac{1}{\sqrt{2}}(v_1 + v_2) \tag{2.21}$$

$$v_4 = \frac{1}{\sqrt{2}}(v_1 - v_2) \tag{2.22}$$

สมการของ v_3 และ v_4 นี้อาจถูกเปลี่ยนแปลงก็ได้ขึ้นอยู่กับความสะดวกของอินพุท แต่ในทั้ง 2 กรณี โดยกรณีใดกรณีหนึ่งเอาต์พุทหนึ่งจะเป็นสัดส่วนกันระหว่างผลรวมผลต่าง เหตุผลของ 1/2 ก็คือผลรวมของกำลังที่ออกมาจะต้องเท่ากับผลรวมของกำลังที่เข้ามา (ไม่รวมความสูญเสียในอุกรณ์)ยกกำลังสองทั้งสองข้างและบวกกันจะได้ดังนี้

$$v_3^{\,2} + v_4^{\,2} = v_1^{\,2} + v_2^{\,2} \tag{2.23}$$

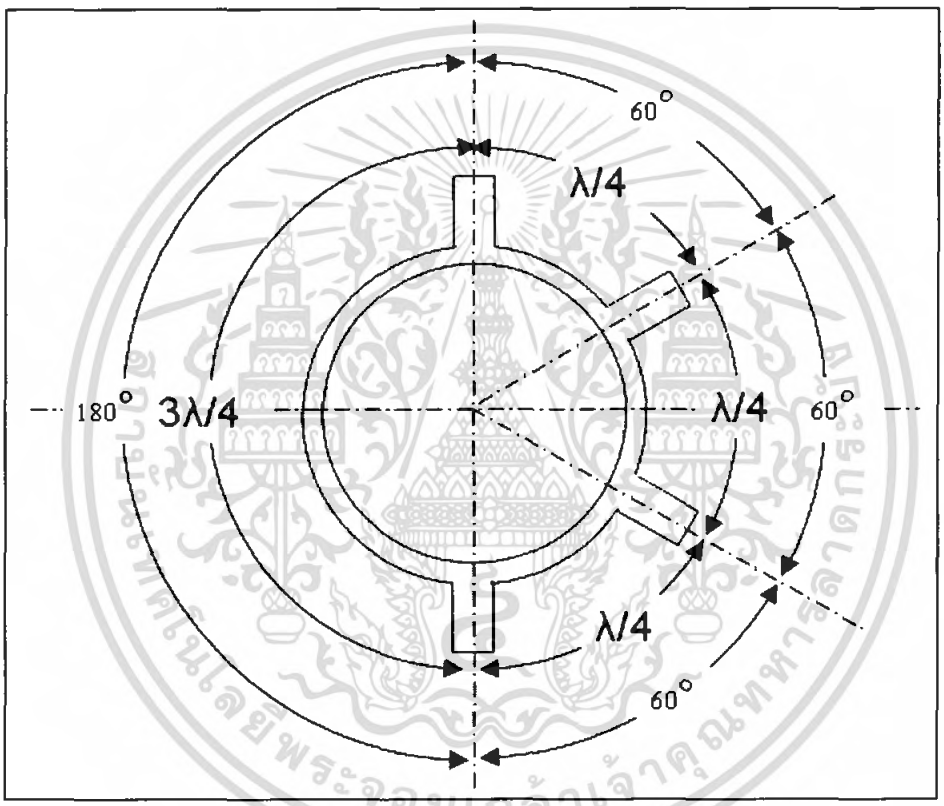
เพราะความสัมพันธ์ของเฟสเป็นผลมาจากความยาวคลื่นที่ใช้ คือจะสามารถใช้ได้เฉพาะความถี่หนึ่งเท่านั้น ดังนั้นอุปกรณ์นี้สามารถนำมาใช้ได้ในแถบความถี่ที่จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การออกแบบและการสร้าง

3.1 การออกแบบตัวเปรียบเทียบสัญญาณ

เมื่อผ่านสายอากาศมาแล้วก็จะนำสัญญาณมาผ่านตัวเปรียบเทียบเฟสสัญญาณเพื่อเป็นตัววิเคราะห์หาทิศทางจากการวิเคราะห์เฟสของสัญญาณผลรวม และเฟสของสัญญาณผลต่าง เพื่อตรวจจับว่าตำแหน่งของเป้าหมายอยู่ทางซ้ายขวา บนหรือล่างของจุดกลางสายอากาศ และสัญญาณผลต่างจะเป็นตัวบอกขนาดของมุมที่ผิดพลาดไป



รูปที่ 3.1 ลักษณะโครงสร้างของไฮบริดริงจังชั่น

เพื่อสะดวกในการแม็ตช์ซึ่งจะให้ค่า Z_0 มีค่า 50 โอมห์ ส่วนความยาวคลื่น λ ที่ใช้ จะใช้ค่าความยาวคลื่นในไมโครสตริปต้องคำนวณหาค่าความกว้าง (w) ของไฮบริดริง โดยใช้สมการที่ 3.1

$$\frac{w}{h} = \frac{8}{e^{A} - 2e^{-A}} \tag{3.1}$$

$$A = \frac{Z_0\sqrt{2(\varepsilon_r + 1)}}{119.1} + \frac{(\varepsilon_r - 1)}{2(\varepsilon_r + 1)}\left\{0.4516 + \frac{0.2416}{\varepsilon_r}\right\} \tag{3.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ Z_0 คือ ค่าอิมพีแดนซ์

ε_r คือ ค่าคงที่ไดอิเลกตริก (Dielectric Constant) มีค่าเท่ากับ 3.5

w คือ ค่าความกว้างของแผ่นตัวนำของไฮบริดริง

h คือ ค่าความหนาของซับสเตรท ซึ่งเท่ากับ 0.762 มิลลิเมตร

ค่าความยาวคลื่นของไมโครสตริป (λ_0)

$$\lambda_0 = \frac{\lambda}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}} \tag{3.3}$$

โดยที่ λ คือ ความยาวคลื่นในอากาศ

ε_{eff} คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริคประสิทธิผล (Effective Dielectric Constant)

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{3.4}$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r + 1}{2}\left\{1 + \frac{12h}{w}\right\}^{-0.5} \tag{3.5}$$

คำนวณหาค่า A จากสมการที่ 3.2 ได้ A = 1.404 และหาค่า w จากสมการที่ 3.1 ได้ w =1.702 มิลลิเมตร สำหรับในส่วนของวงแหวนจะมีค่าความต้านทานเท่ากับ z = 70.7 Ω นำไปแทนสมการที่ 3.6 เพื่อหา A และ w ของวงแหวนไฮบริดริง

$$A = \frac{z\sqrt{2(\varepsilon_r + 1)}}{119.9} + \frac{(\varepsilon_r - 1)}{2(\varepsilon_r + 1)}\left\{0.46 + \frac{0.22}{\varepsilon_r}\right\} \tag{3.6}$$

ได้ค่า A = 1.914 , w = 0.940 มิลลิเมตร

โดยค่า λ เท่ากับ 63.425 มิลลิเมตร และค่า ε_{eff} เท่ากับ 2.6316

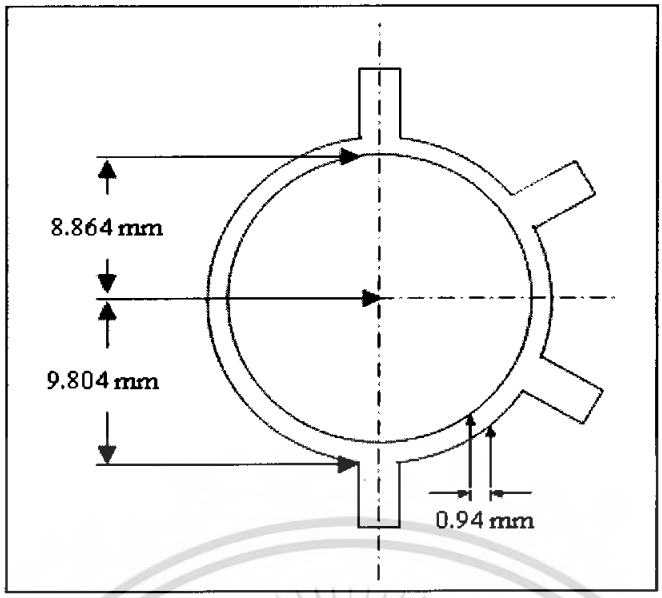
เพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ค่าความยาวคลื่นของไมโครสตริป (λ_0) เท่ากับ 34.097 มิลลิเมตร

สามารถหารัศมีของวงไฮบริดริงได้เท่ากับ 9.334 มิลลิเมตร

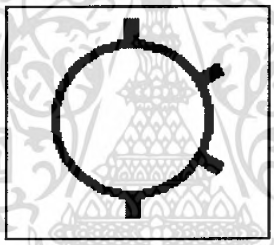
สามารถหารัศมีวงนอกของวงไฮบริดริงได้เท่ากับ 9.804 มิลลิเมตร

สามารถหารัศมีของวงไฮบริดริงได้เท่ากับ 8.864 มิลลิเมตร

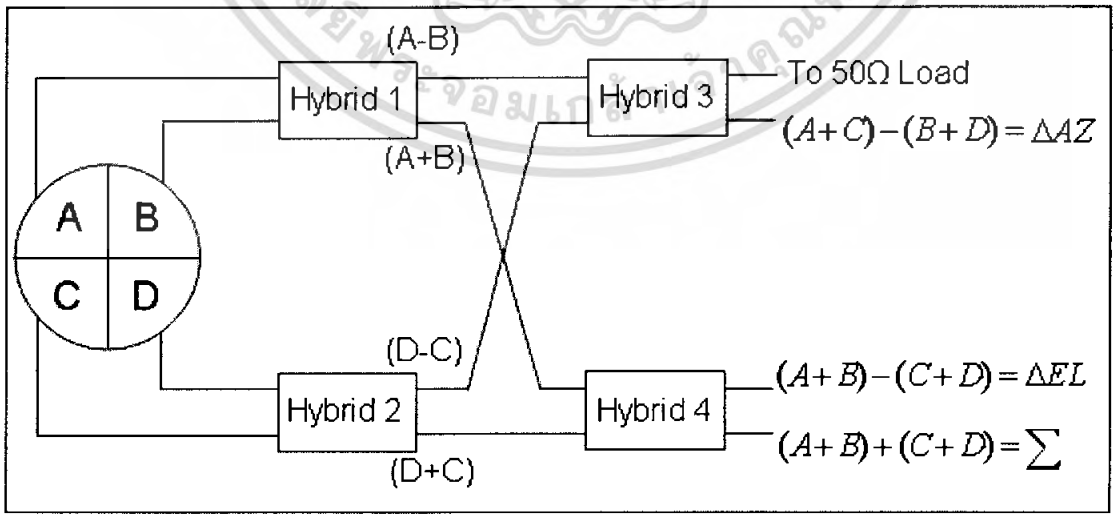
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 แถบสตริปของวงจรไฮบริดริงจังชั่นที่ได้จากการคำนวณ

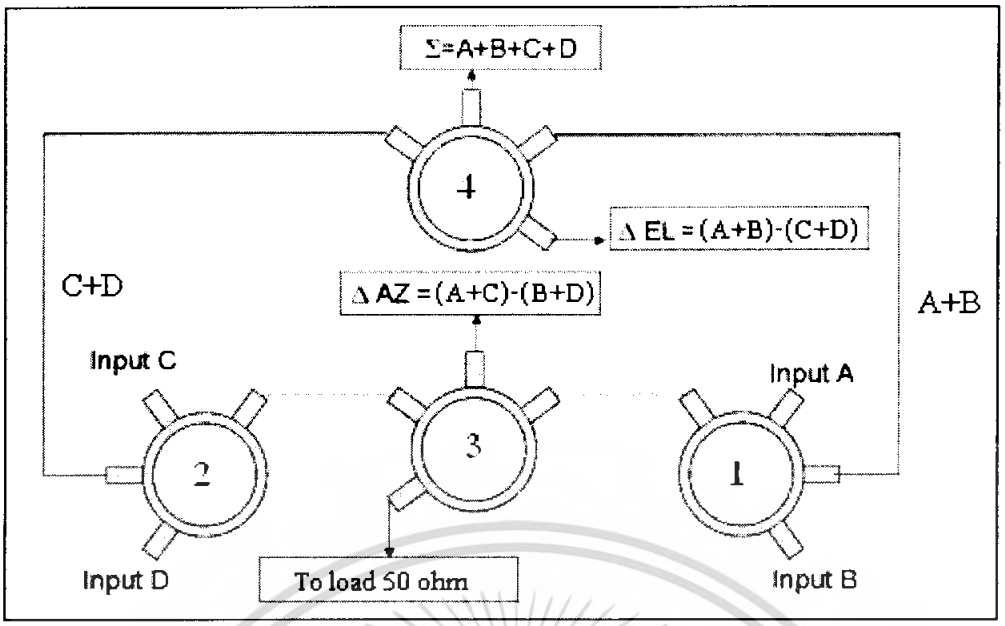


รูปที่ 3.3 แถบของวงจรไฮบริดริงจังชั่นขนาดเท่าของจริง



รูปที่ 3.4 บล๊อคไดอะแกรมการทำงานของไฮบริดริงเมื่อนำมาเปรียบเทียบสัญญาณจากสายอากาศ 4 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 รูปแบบวงจรไฮบริดริงเมื่อนำมาต่อเป็นวงจรเปรียบเทียบสัญญาณ(Monopulse hybrid assembly)

จากรูปที่ 3.4 และ รูปที่3.5 ไฮบริดริงตัวแรกจะรับสัญญาณจากสายอากาศเฮลิคอล A และ B นำสัญญาณทั้งสองมาหาผลรวมและผลต่าง เช่นเดียวกับไฮบริดริงตัวที่สองจะรับสัญญาณจาสายอากาศเฮลิคอล C และ D จากนั้นไฮบริดริงตัวแรกจะส่งผลรวมไปยังไฮบริดริงตัวที่สี่ และส่งผลต่างไปยังไฮบริดริงตัวที่สาม ในขณะที่ไฮบริดริงตัวที่สองก็จะส่งผลรวมไปยังไฮบริดตัวที่สี่ และส่งผลต่างไปยังไฮบริดตัวที่สามเช่นเดียวกัน สัญญาณที่ออกจากไฮบริดตัวที่สามก็จะเป็นสัญญาณ ΔEL และสัญญาณ $\sum$ ส่วนสัญญาณที่ออกจากไฮบริดตัวที่สี่ก็จะเป็นสัญญาณ ΔAZ และสัญญาณที่ต่อไปยังโหลด 50โอห์ม ดังรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5

3.2 การออกแบบสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน

จากคุณสมบัติของสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกนที่กล่าวมาในบทต้นๆ จะพบว่าถ้าต้องการให้สายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกน ทำงานในลักษณะที่ให้คลื่นมีโพลาไรเซชั่นวงกลมในแนวแกนของสายอากาศ จะต้องออกแบบให้เส้นรอบวงของสายอากาศ มีมุมพิทช์และจำนวนรอบมีค่าดังนี้คือ

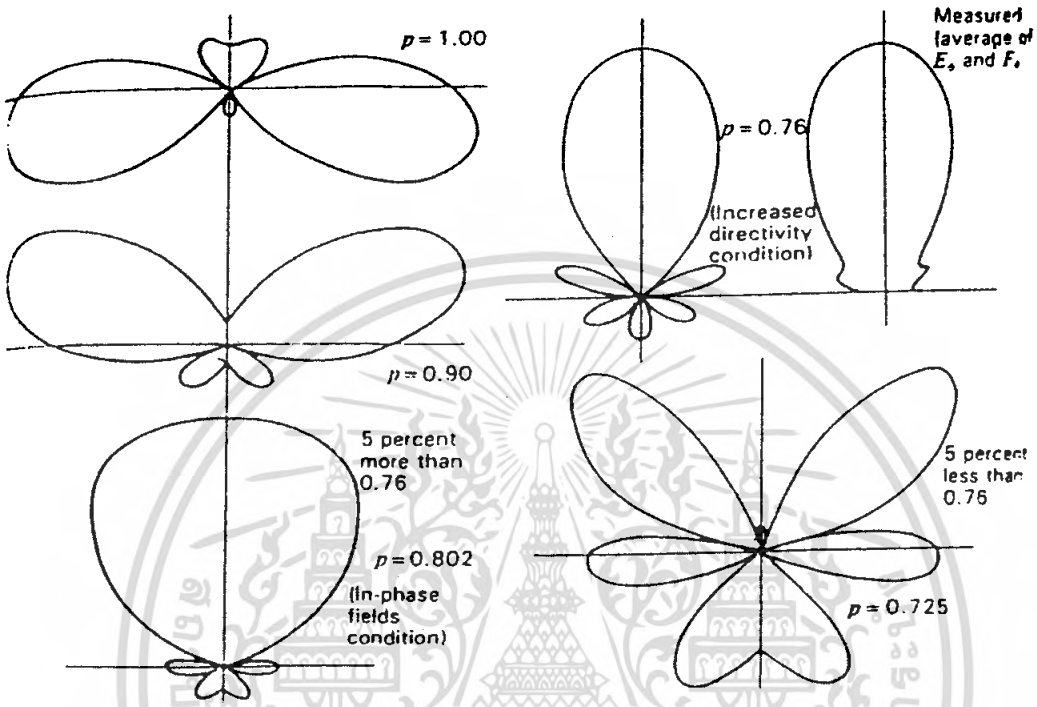
$$0.75 \leq c_{\lambda} \leq 1.2$$

$$12^{\circ} \leq \alpha \leq 15^{\circ}$$

$$n \leq 3$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกค่าหนึ่งที่จะทำให้แพทเทอร์นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า มีทิศทางตามแนวแกน และมีผลทำให้ไซด์โลบมีค่าต่ำ เมื่อเปรียบเทียบกับโลบหลัก คือจะต้องมีความเร็วเฟสของกระแสบนสายอากาศอยู่ระหว่าง 0.75 ถึง0.805



รูป3.6 แพทเทอร์นของสายอากาศเฮลิคอลเมื่อมีความเร็วเฟสของกระแสต่างกัน

แสดงสูตรการคำนวณคุณนะสมบัติในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาสเฮลิคอลโหมดแนวแกน

อินพุตอิมพีแดนซ์ $140C_\lambda$ (Ω) (3.7)

ฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์(HPBW) $\frac{52}{C_\lambda\sqrt{n.S_\lambda}}$ (องศา) (3.8)

บีมวิดท์ระหว่างนัลคู่แรก(FNBW) $\frac{115}{C_\lambda\sqrt{n.S_\lambda}}$ (องศา) (3.9)

แกน(GAIN) $11.8+10\log C\lambda^2.n.S_\lambda$ (dBi)..... ...(3.10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสามารถในการชี้ทิศทาง(Directivity) $12C\lambda^2.n.S_\lambda$ (3.11)

อัตราส่วนระหว่างโพลาไรเซชั่นแกนหลัก(Axial ratio) $\left|L_\lambda\left(\sin\alpha-\frac{1}{p}\right)\right|$ (3.12)

ความเร็วแสงของกระแสบนสายอากาศเฮลิคอล $\frac{1}{\sin\alpha+\left(\frac{\lambda}{C}\cos\alpha\right)}$ (3.13)

เมื่อโครงสร้างของสายอากาศเฮลิคอลประกอบด้วย

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางขดลวดของสายอากาศเฮลิคอล

C คือ ความยาวเส้นรอบวงขดลวดของสายอากาศเฮลิคอล

S คือ ระยะห่างระหว่างขดลวดของสายอากาศเฮลิคอล

α คือ มุมพิตช์

L คือ ความยาวขดลวดหนึ่งรอบ

n คือ จำนวนรอบขดลวด

a คือ รัศมีของขดลวดตัวนำ

ความถี่ที่เราต้องการออกแบบสายอากาศคือ 4.73 GHz

ความยาวคลื่น(λ) $= \frac{C}{f}$ (m) (3.14)

$= \frac{3\times10^8}{4.73\times10^9}$

$= 63.42$ (mm)

เพื่อให้แพทเทิร์นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในทิศทางตามแนวแกน จึงกำหนดให้มีความยาวเส้นรอบวงขดลวดของสายอากาศเฮลิคอล (C_λ) เท่ากับ $= 0.914\lambda$ เพื่อจะได้มีความเร็วเฟสของกระบนสายอากาศ อยู่ในช่วงที่ทำให้แพทเทิร์นชี้ไปตามแนวแกนของสายอากาศ ซึ่งจะได้ความเร็วเฟสของกระแสบนสายอากาศ(ρ) เท่ากับ 0.775

$C_\lambda = 0.914\lambda$ (3.15)

$= 0.914\times63.42$

$= 58$ (mm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เส้นผ่านศูนย์กลางขดลวดของสายอากาศเฮลิคอล (D_λ)

$$D_\lambda = \frac{C_\lambda}{\pi} \tag{3.16}$$
$$= \frac{58}{3.1416}$$
$$= 0.29\lambda$$
$$= 18.5 \text{ (mm)}$$

กำหนดให้สายอากาศมีมุมพิตช์ (α) เท่ากับ 13°

กำหนดให้สายอากาศมีจำนวนรอบ n เท่ากับ 4 รอบ

ระยะห่างระหว่างขดลวดแต่ละรอบของสายอากาศ (S_λ)

$$S_\lambda = \pi . D_\lambda . \tan\alpha \tag{3.17}$$
$$= 3.1416 \times 0.29 \tan 13°$$
$$= 0.21\lambda$$
$$= 13.41 \text{ (mm)}$$

ความยาวขดลวดหนึ่งรอบ (L_λ)

$$L_\lambda = \sqrt{S_\lambda{}^2 + (\pi D)^2} \tag{3.18}$$
$$= \sqrt{13.41^2 + (3.1416 \times 18.5)^2}$$
$$= 0.940\lambda$$
$$= 59.64 \text{ (mm)}$$

เส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นสะท้อน $= 0.75C_\lambda$ (3.19)

$= 43.5$ (mm)

สามารถคำนวณคุณสมบัติต่างๆในการแพร่กระจายคลื่นของสายอากาศเฮลิคอลได้ดังนี้

หาค่าอินพุทอิมพีแดนซ์แทนค่าลงในสมการที่ 3.7

$$= 127.96 \text{ } (\Omega)$$

หาค่าฮาร์ฟเพาเวอร์บีมวิดท์แทนค่าลงในสมการที่ 3.8

$$= \frac{52}{0.914\sqrt{4 \times 0.21}}$$
$$= 62.8 \text{ (องศา)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หาค่าบีมวิดท์ระหว่างนัลคู่แรกแทนค่าลงในสมการที่ 3.9

$$= \frac{115}{0.914\sqrt{4 \times 0.21}}$$

$$= 137.28 \text{ (องศา)}$$

หาค่า Gain ของสายอากาศ แทนค่าลงในสมการที่ 3.10

$$= 11.8 + 10\log(0.914 \times 4 \times 0.21)$$

$$= 10.65 \text{ (dBi)}$$

หาค่าความสามารถในการชี้ทิศทางแทนค่าลงในสมการที่ 3.11

$$= 12 \times 0.914^2 \times 4 \times 0.21$$

$$= 8.42$$

หาค่าความเร็วเฟสของกระแสแทนค่าลงในสมการที่ 3.13

$$= \frac{1}{\sin 13 + \left(\frac{63.42}{58}\cos 13\right)}$$

$$= 0.775$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 โครงสร้างที่จะนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า

ในการวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆของไฮบริดริงจังชั่นและสายอากาศเฮลิคอล จะอาศัยโปรแกรมการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้ารุ่นที่ 5 (Microwave Studio Version 5) หรือ CST ช่วยในการวิเคราะห์ หาโครงสร้างของไฮบริดริงจังชั่น และสายอากาศเฮลิคอลที่ทำให้ได้คุณลักษณะต่างๆของไฮบริดริงจังชั่นและสายอากาศเฮลิคอลดีที่สุด เช่นค่าฟังก์ชั่นการลดทอนการสะท้อน S_{11} (Return Loss) การใช้วิธีการวิเคราะห์หาโครงสร้างที่ดีที่สุดนี้เพื่อประมาณค่าโครงสร้างให้ได้ตามค่าที่เรากำหนดในการวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆ

3.4 การวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆของไฮบริดริงจังชั่นโดยอาศัยโปรแกรมการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้ารุ่นที่ 5 (Microwave Studio Version 5) หรือ CST

จากการออกแบบในบทที่ 3 จะได้ขนาดโครงสร้างของไฮบริดริงดังนี้

ได้ค่า A = 1.914 , W = 0.940 มิลลิเมตร

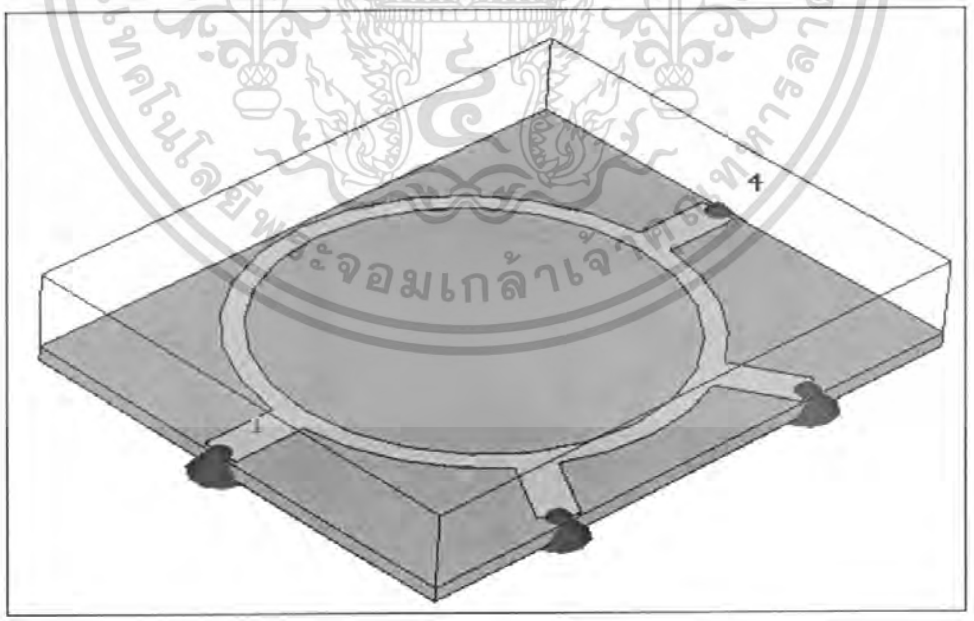
โดยค่า λ เท่ากับ 63.425 มิลลิเมตร และค่า ε_{eff} เท่ากับ 2.6316

เพราะฉะนั้นจะทำให้ได้ค่าความยาวคลื่นของไมโครสตริป (λ_0) เท่ากับ 34.097 มิลลิเมตร

สามารถหารัศมีของวงไฮบริดริงได้เท่ากับ 9.334 มิลลิเมตร

สามารถหารัศมีวงนอกของวงไฮบริดริงได้เท่ากับ 9.804 มิลลิเมตร

สามารถหารัศมีของวงไฮบริดริงได้เท่ากับ 8.864 มิลลิเมตร

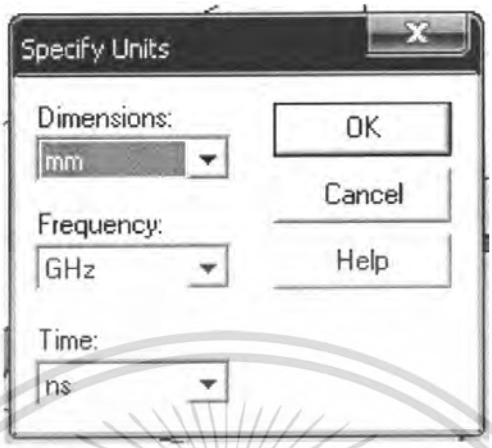


รูปที่ 3.7 รูปโครงสร้างไฮบริดริงที่จำลองโครงสร้างโดยใช้โปรแกรม CST

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 การจำลองโครงสร้างไฮบริดริงลงในโปรแกรมการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้าหรือ CST

ทำการกำหนดหน่วยการวัดเป็นมิลลิเมตรดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 การกำหนดหน่วยการวัดเป็นมิลลิเมตร

ทำการกำหนดพิกัดต่างๆของแบบจำลองโดยใช้โครงสร้างพื้นฐาน มาเชื่อมต่อกันให้ได้โครงสร้างที่เป็นรูปแบบที่ต้องการ ดังรูปที่ที่ 3.9

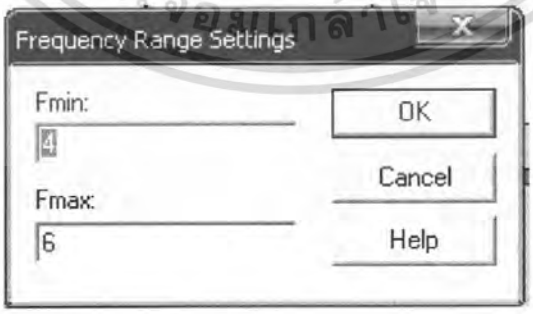
รูปที่ 3.9 การกำหนดโครงสร้างของไฮบริดริงจังชั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดคุณสมบัติของพื้นหลังดังรูปที่ 3.10

รูปที่ 3.10 กำหนดสภาวะภายนอกของการวิเคราะห์

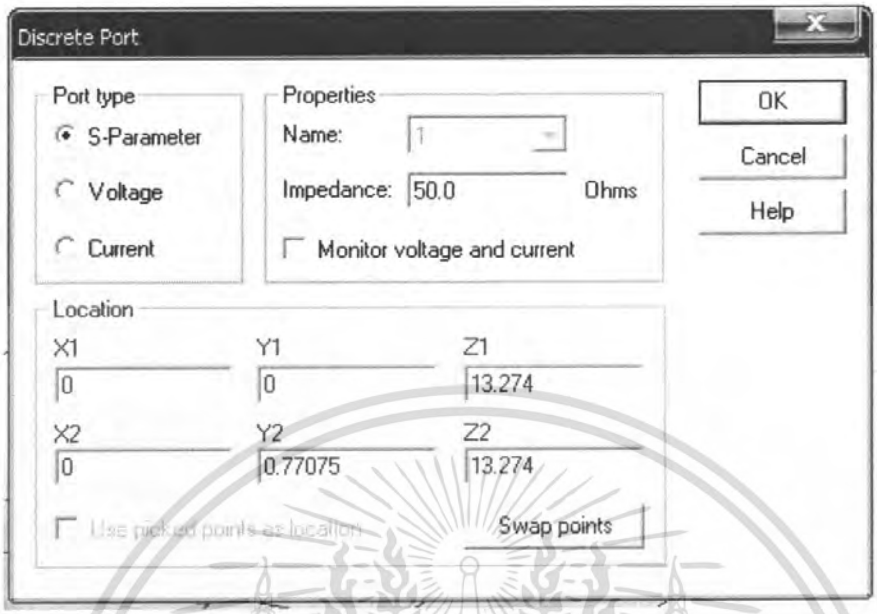
กำหนดช่วงความถี่ที่ทำการป้อนให้แบบจำลองดังรูปที่ 3.11



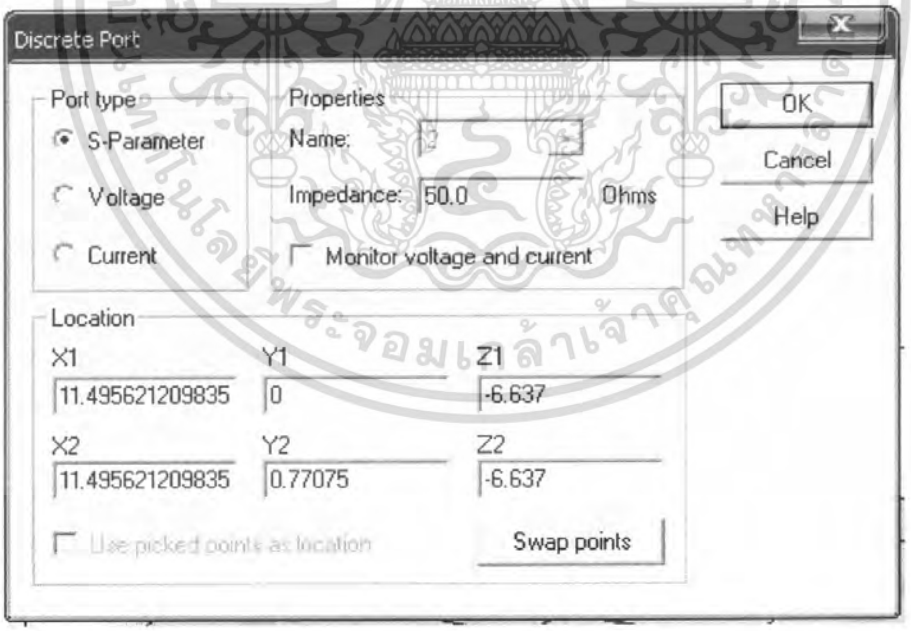
รูปที่ 3.11 กำหนดช่วงความถี่ที่ป้อนให้กับไฮบริดริงจังชั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดช่องทางหารป้อนสัญญาณดังรูปที่ 3.12

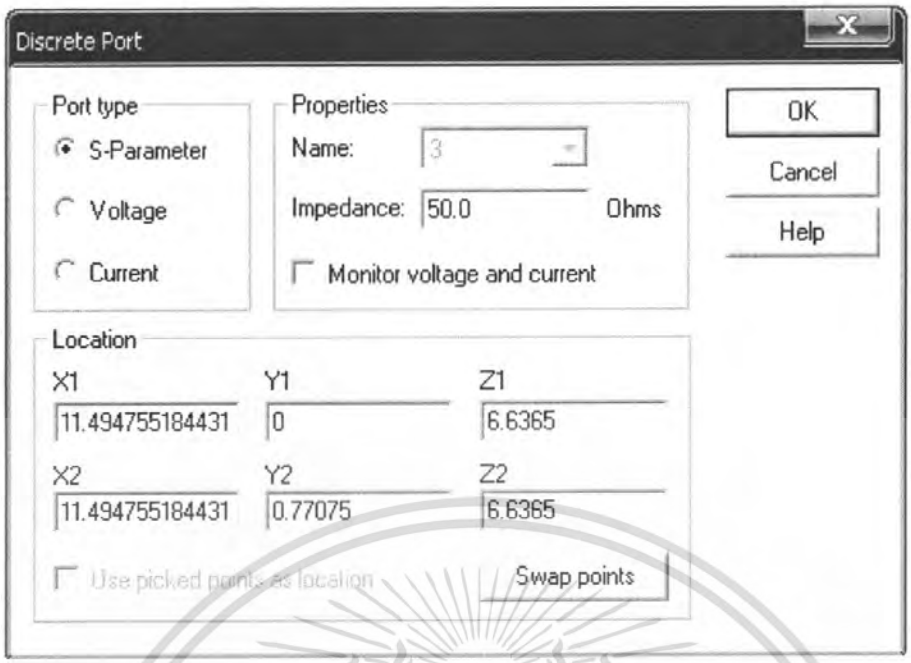


รูปที่ 3.12 (ก) ช่องทางป้อนสัญญาณที่ 1

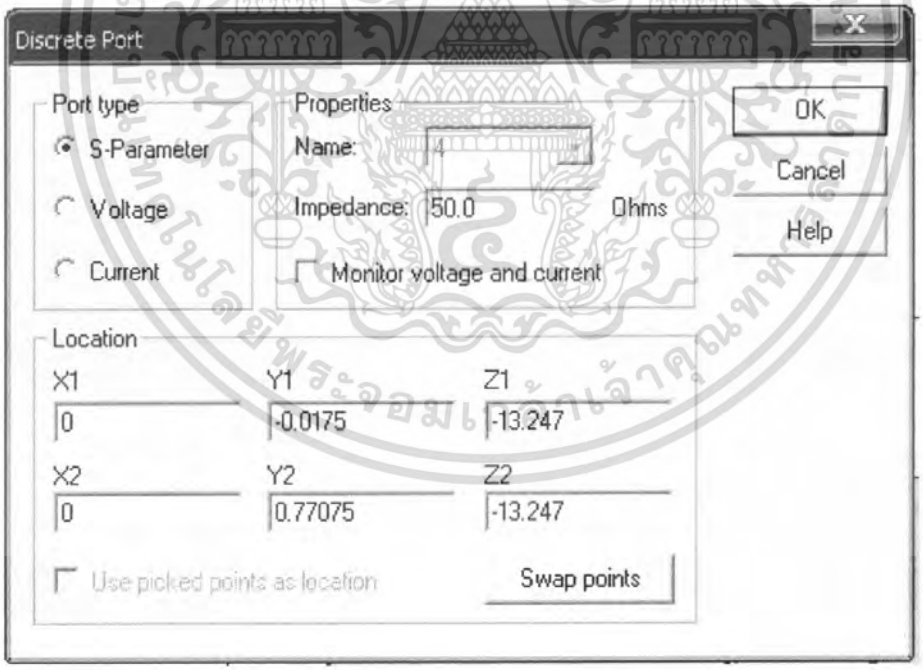


รูปที่ 3.12 (ข) ช่องทางป้อนสัญญาณที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



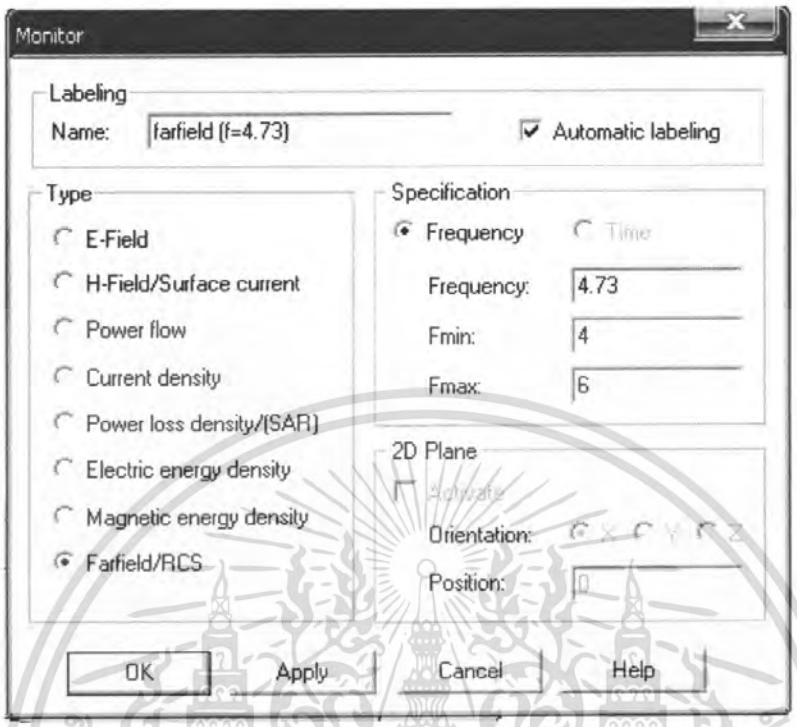
รูปที่ 3.12 (ค) ช่องทางป้อนสัญญาณที่ 3



รูปที่ 3.12 (ง) ช่องทางป้อนสัญญาณที่ 4

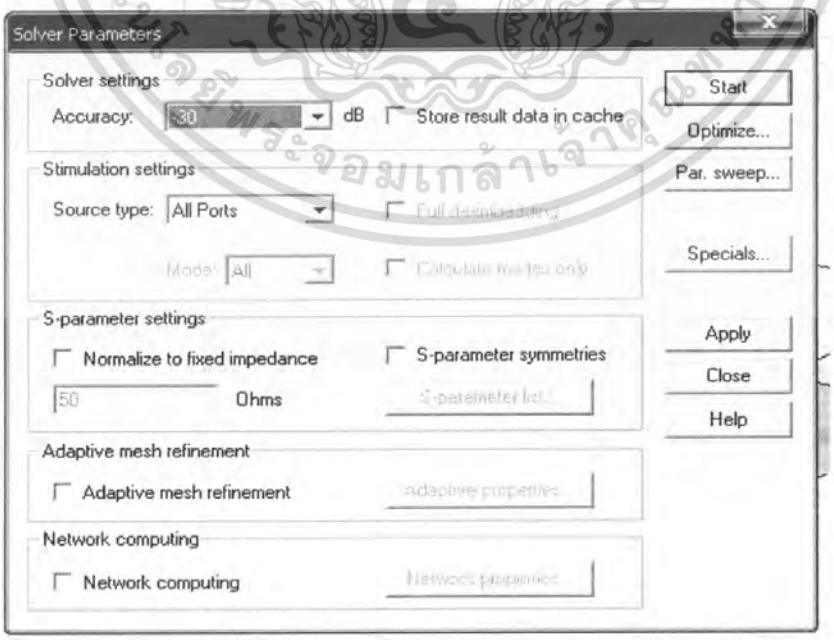
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดความถี่ที่เราต้องการดูลักษณะการส่งผ่านในแต่ละช่องสัญญาณ ดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 กำหนดความถี่ที่ต้องการดูลักษณะการส่งผ่าน

ทำการวิเคราะห์โดยใช้คำสั่ง Transient Solver Parameter ดังรูปที่ 3.14

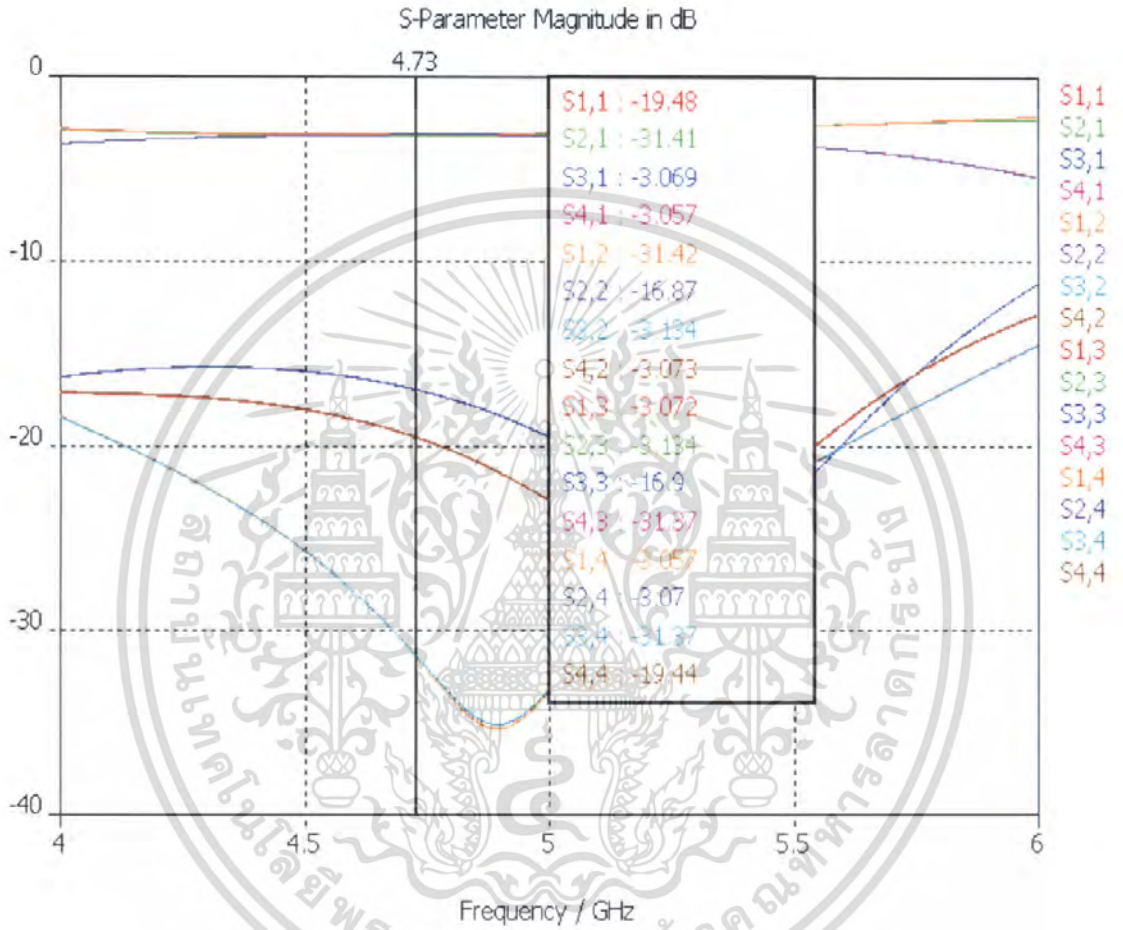


รูปที่ 3.14 การวิเคราะห์คุณสมบัติของไฮบริดริงจังชั่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

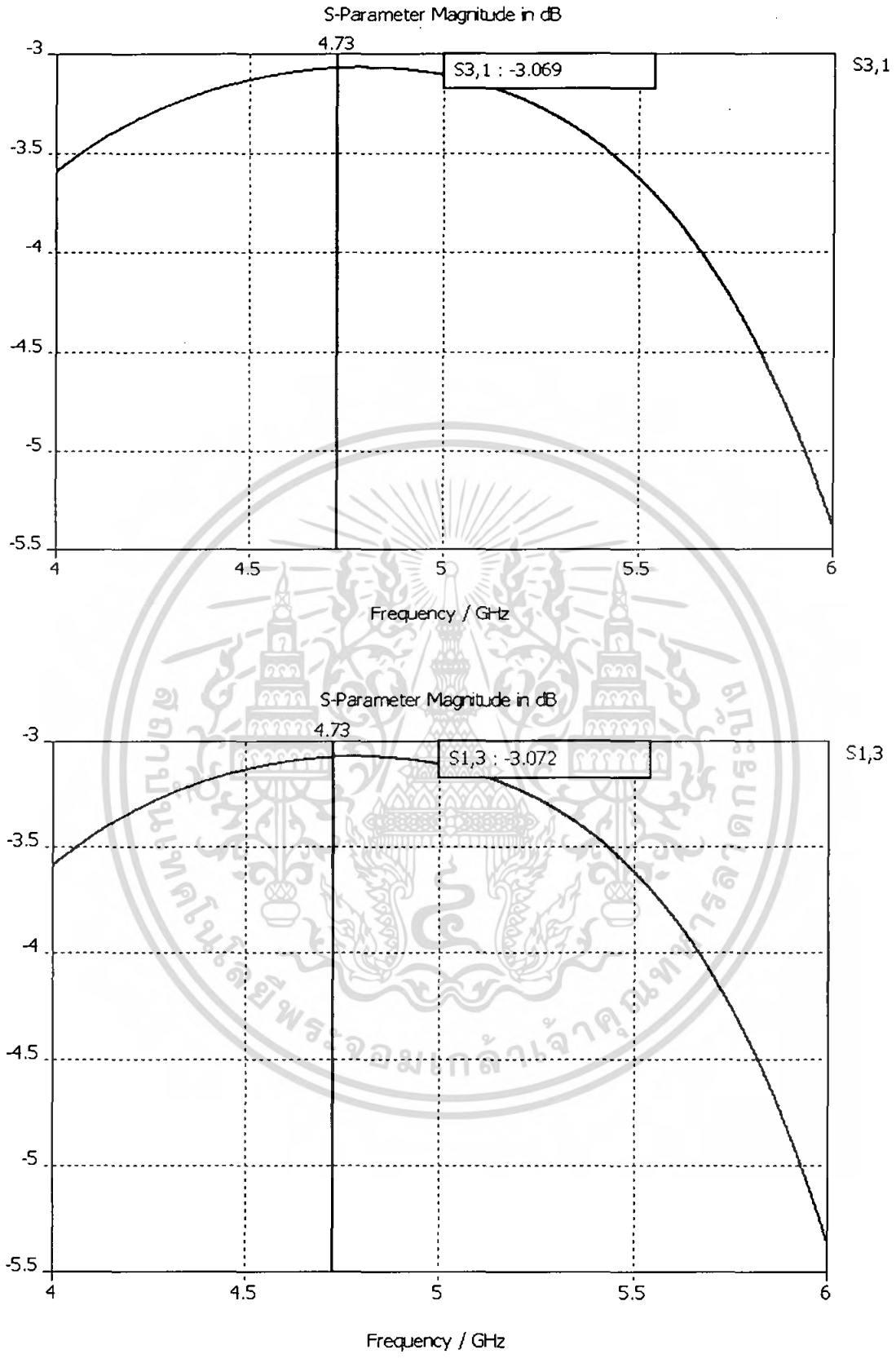
3.4.2 ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม CST ของไฮบริดริงจังชั่นที่ความถี่กลาง 4.73 GHz

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของไฮบริดริงจังชั่นด้วยโปรแกรม CST ที่ความถี่ 4.73 GHz นั้น จะอยู่ในรูปของกราฟคุณลักษณะดังรูปที่ 3.15



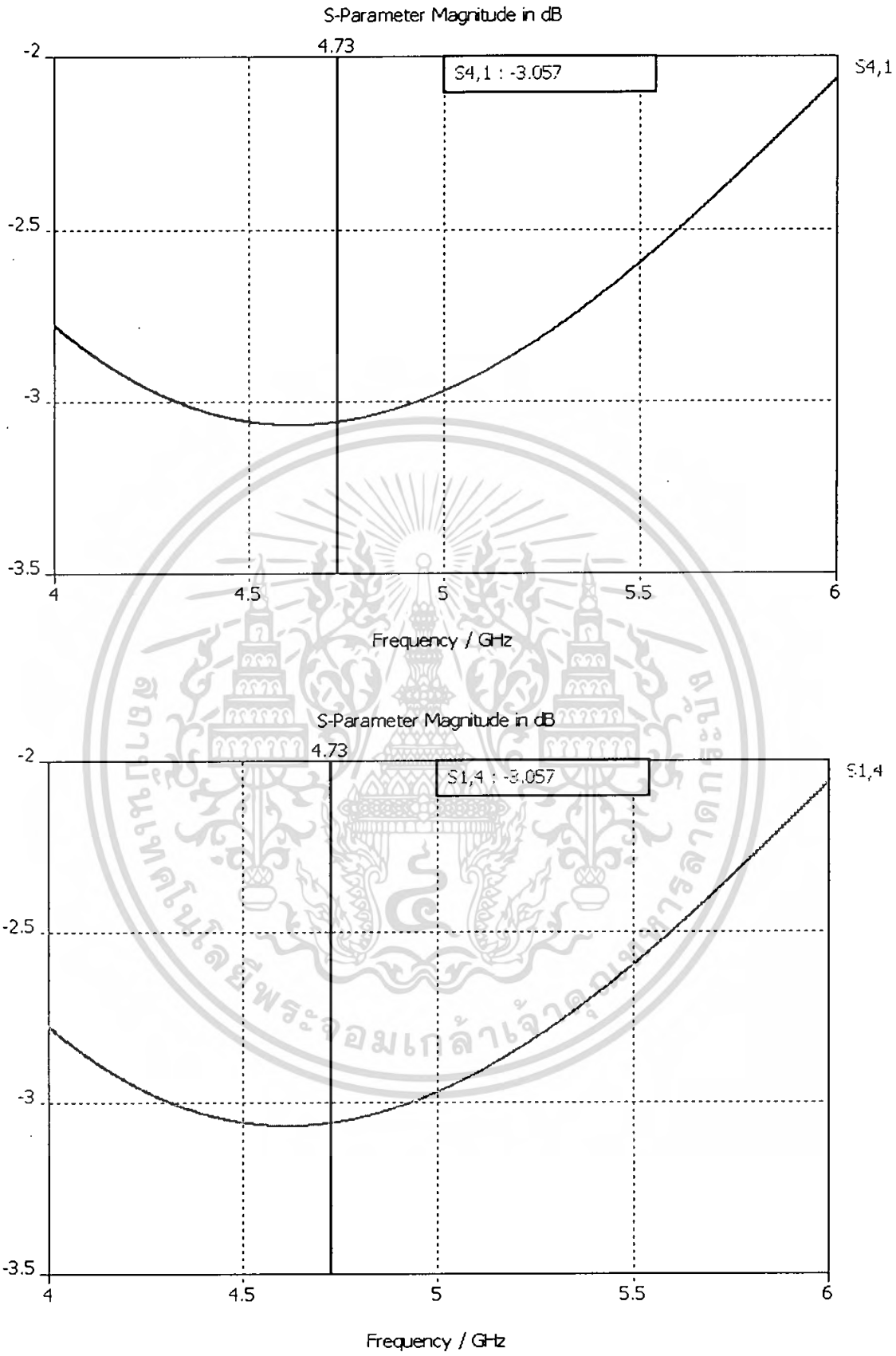
รูปที่ 3.15 ผลจากการจำลองการทำงานของไฮบริดริงด้วยโปรแกรมCST

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



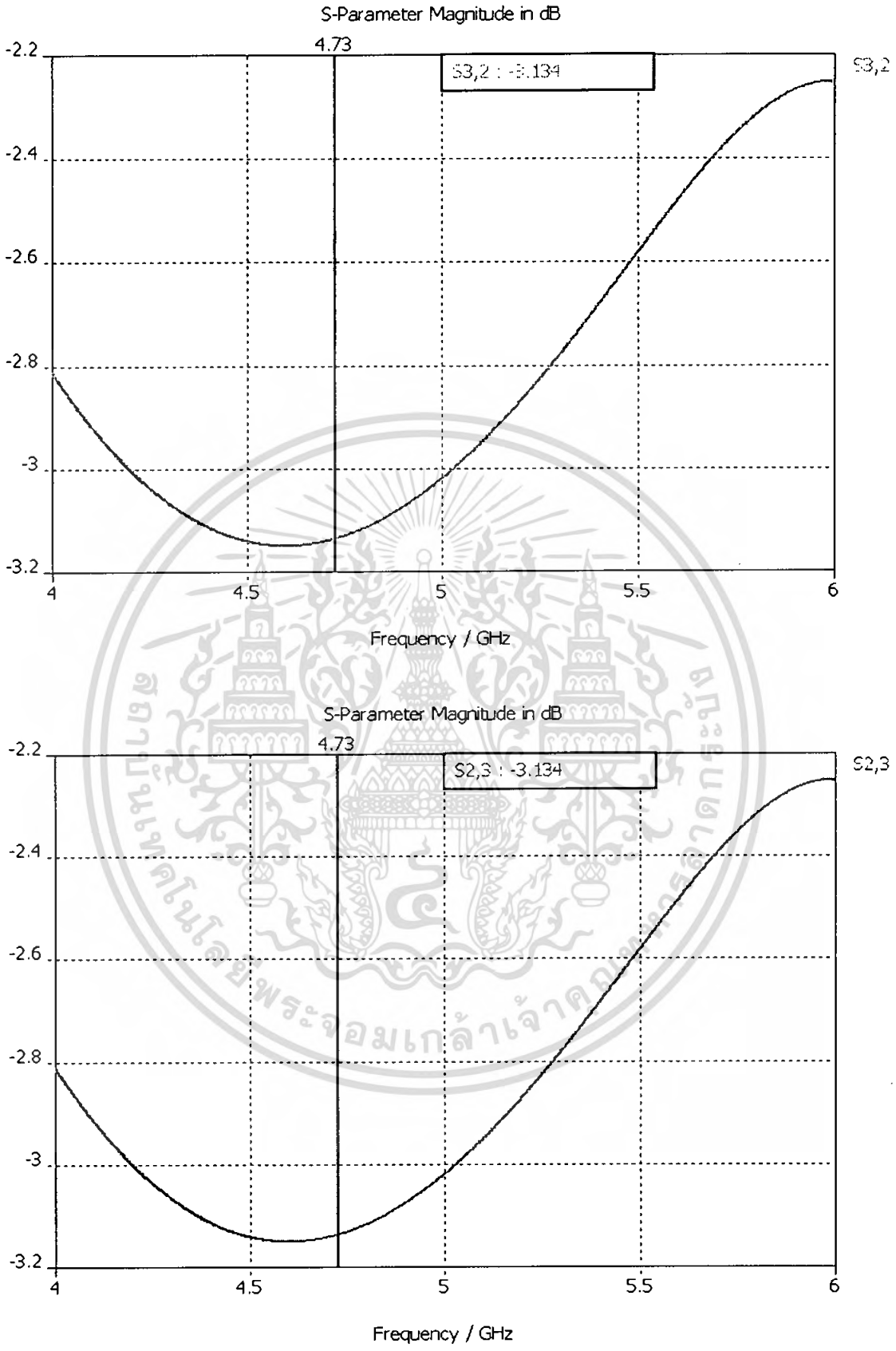
รูปที่ 3.16(ก) การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ตที่ 1 ไปยังพอร์ตที่ 3 และ จากพอร์ตที่ 3 ไปยังพอร์ตที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



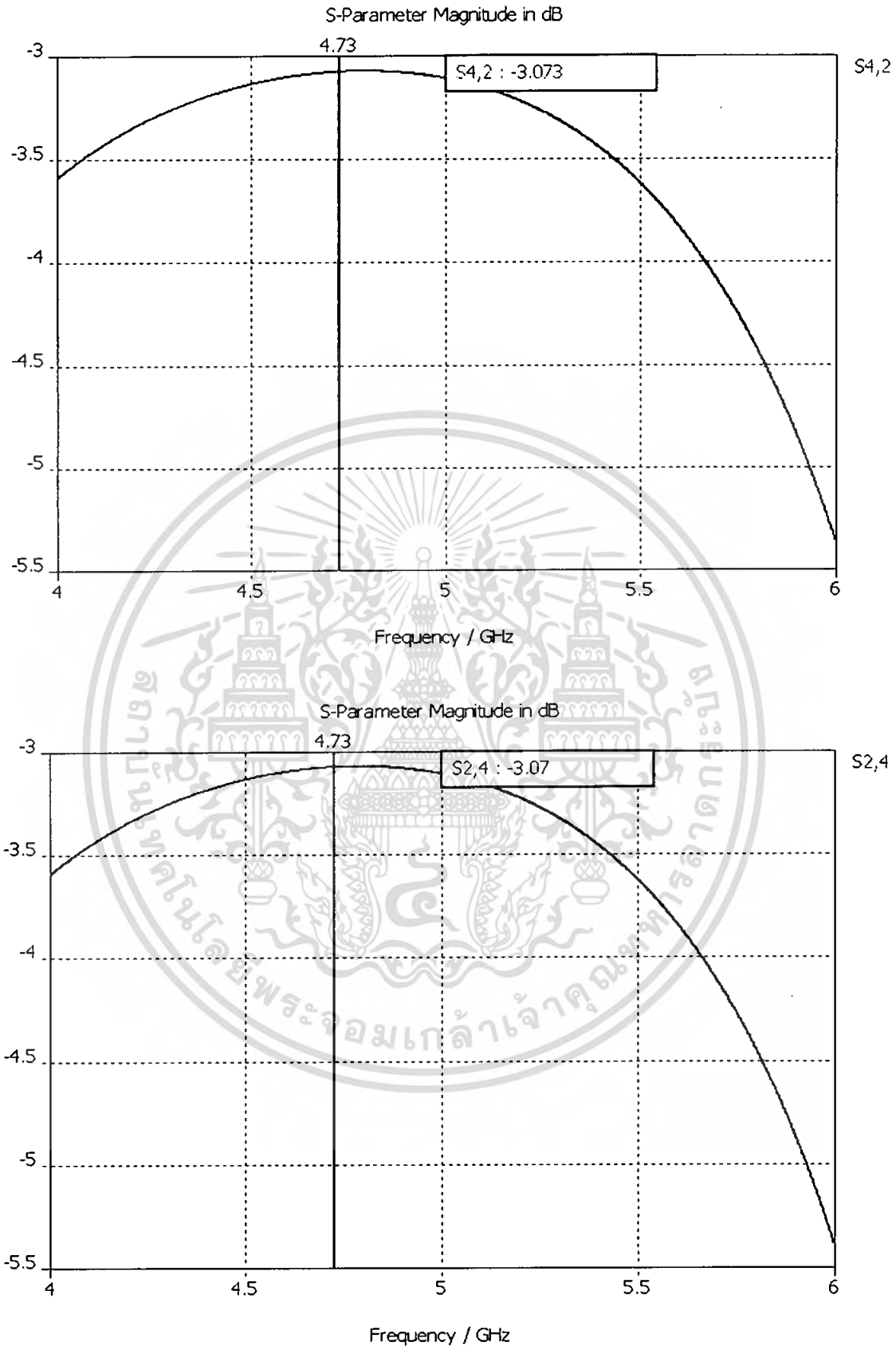
รูปที่ 3.16(ข) การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ตที่ 1 ไปยังพอร์ตที่ 4 และ จากพอร์ตที่ 4ไปยังพอร์ตที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16(ค) การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ตที่ 2 ไปยังพอร์ตที่ 3 และ จากพอร์ตที่ 3 ไปยังพอร์ตที่ 2

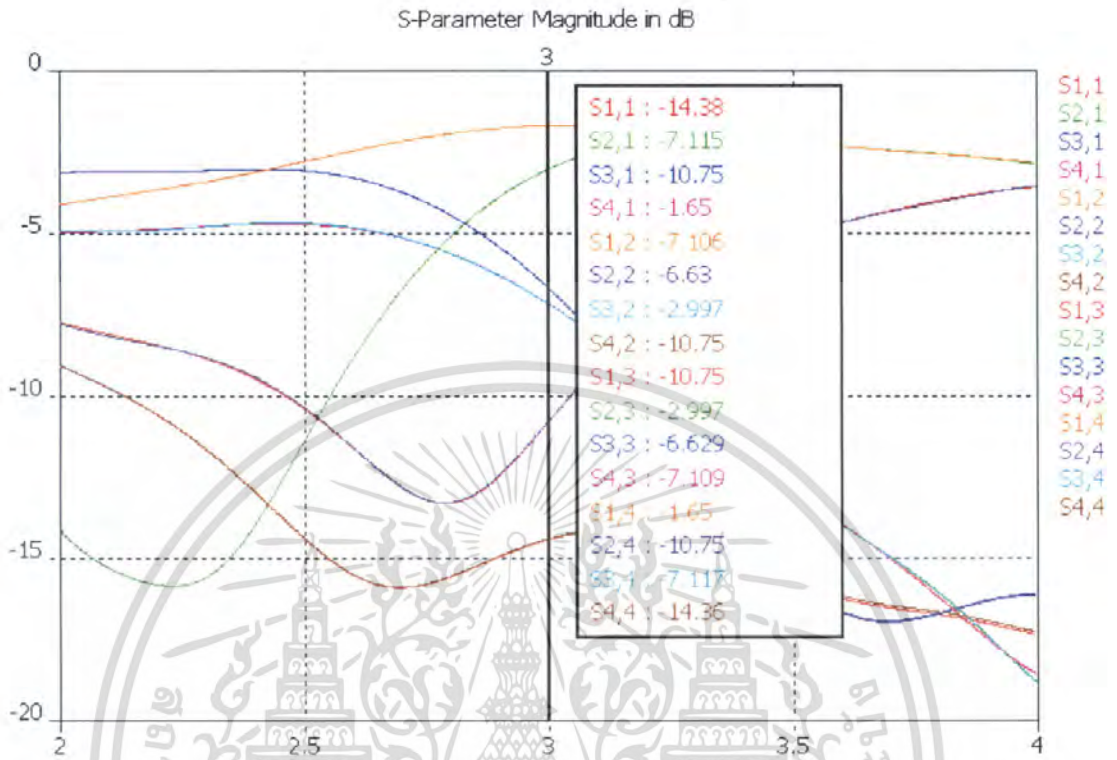
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16(ง) การส่งผ่านสัญญาณจากพอร์ตที่ 2 ไปยังพอร์ตที่ 4 และ จากพอร์ตที่ 4 ไปยังพอร์ตที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลองใช้โครงสร้างเดิมแต่เปลี่ยนความถี่เป็น 3 GHz ตามรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 การส่งผ่านสัญญาณในแต่ละช่องสัญญาณที่ความถี่ 3 GHz

3.4.3 สรุปผลการวิเคราะห์ไฮบริดริงจังชัน

ผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎี โปรแกรม CST จึงทำให้ได้ขนาดของโครงสร้างและคุณสมบัติ ซึ่งสรุปได้ว่า การส่งผ่านในแต่ละพอร์ตที่ความถี่ 4.73 GHz สามารถส่งผ่านได้แต่มีการสูญเสียในการส่งผ่านประมาณ -3 dB แต่เมื่อลองเปลี่ยนความถี่อื่น ปรากฏว่ามีบางช่องสัญญาณที่ไม่สามารถส่งผ่านสัญญาณได้ ซึ่งตรงไปตามทฤษฎีที่บอกว่า ไฮบริดริงสามารถใช้ได้เฉพาะในช่วงความถี่ใดความถี่หนึ่งเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การวิเคราะห์คุณลักษณะต่างๆของสายอากาศเฮลิคอลโดยใช้โปรแกรมการคำนวณแม่เหล็กฟ้ารุ่นที่ 5 (Microwave Studio Version 5) หรือ CST

จากการออกแบบในข้างต้น จะได้ขนาดโครงสร้างของสายอากาศเฮลิคอลดังนี้

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางขดลวดของสายอากาศเฮลิคอล = 18.5 (mm)

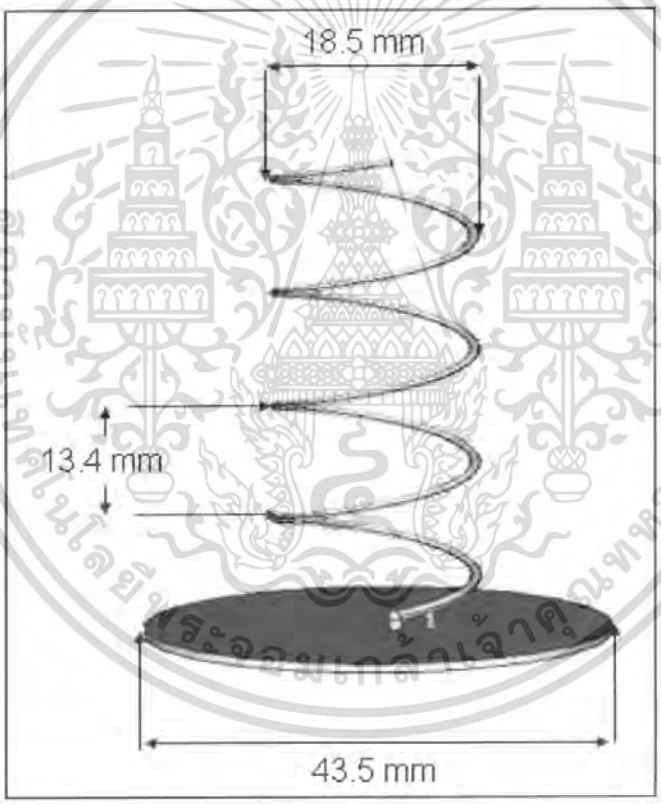
S คือ ระยะห่างระหว่างขดลวดของสายอากาศเฮลิคอล = 13.41 (mm)

α คือ มุมพิตช์ มีขนาดเท่ากับ 13°

L คือ ความยาวขดลวดหนึ่งรอบ = 59.64 (mm)

n คือ จำนวนรอบขดลวด = 4 รอบ

a คือ รัศมีของขดลวดตัวนำ 1 (mm)

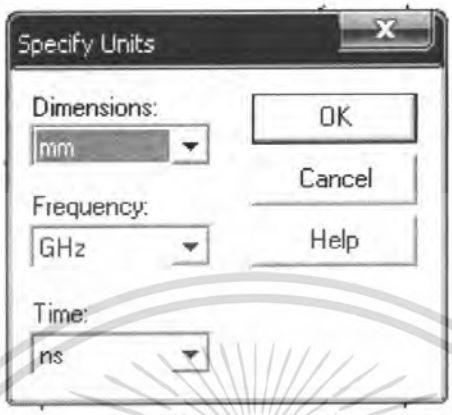


รูปที่ 3.18รูปโครงสร้างสายอากาศเฮลิคอลที่จำลองโครงสร้างโดยใช้โปรแกรม CST

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.1 การจำลองโครงสร้างลงในโปรแกรมการคำนวณแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ CST

ทำการกำหนดหน่วยการวัดเป็นมิลลิเมตรดังรูปที่ 3.19



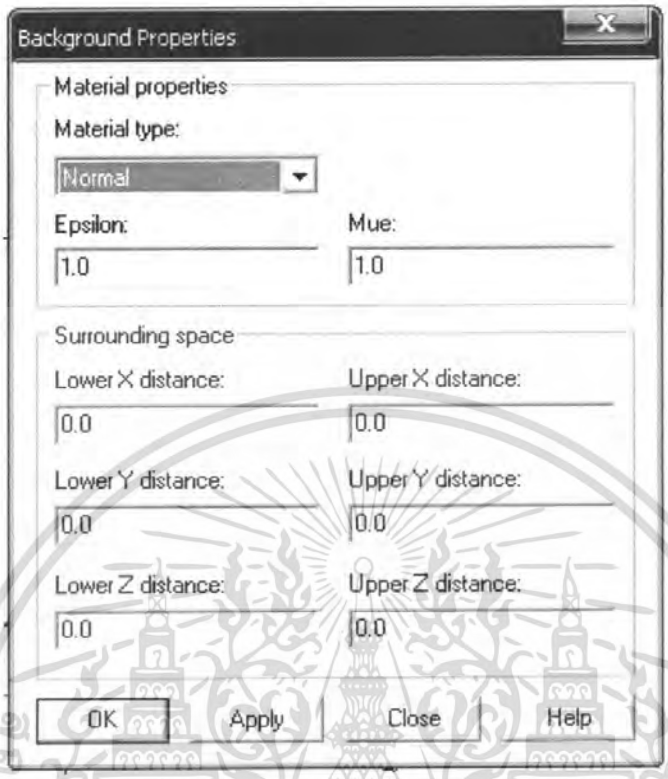
รูปที่ 3.19 การกำหนดหน่วยการวัดเป็นมิลลิเมตร

ทำการการพิกัดต่างๆของแบบจำลองโดยใช้โครงสร้างพื้นฐาน มาเชื่อมต่อกันให้ได้เป็นโครงสร้างตามที่ออกแบบไว้ ตามรูปที่ 3.20

รูปที่ 3.20 การกำหนดโครงสร้างของไฮบริดริงจังชั่น

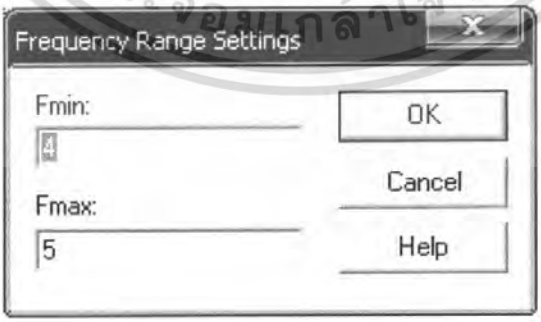
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดคุณสมบัติของพื้นหลังดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 กำหนดสภาวะภายนอกของการวิเคราะห์

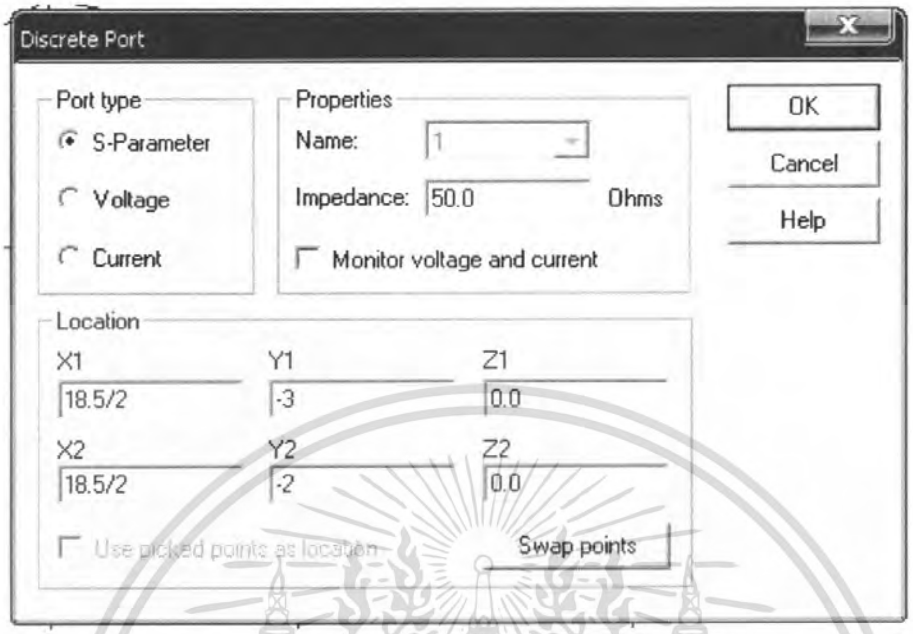
กำหนดช่วงความถี่ที่ทำการป้อนให้แบบจำลองดังรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 กำหนดช่วงความถี่ที่ป้อนให้กับไฮบริดริงจังชั่น

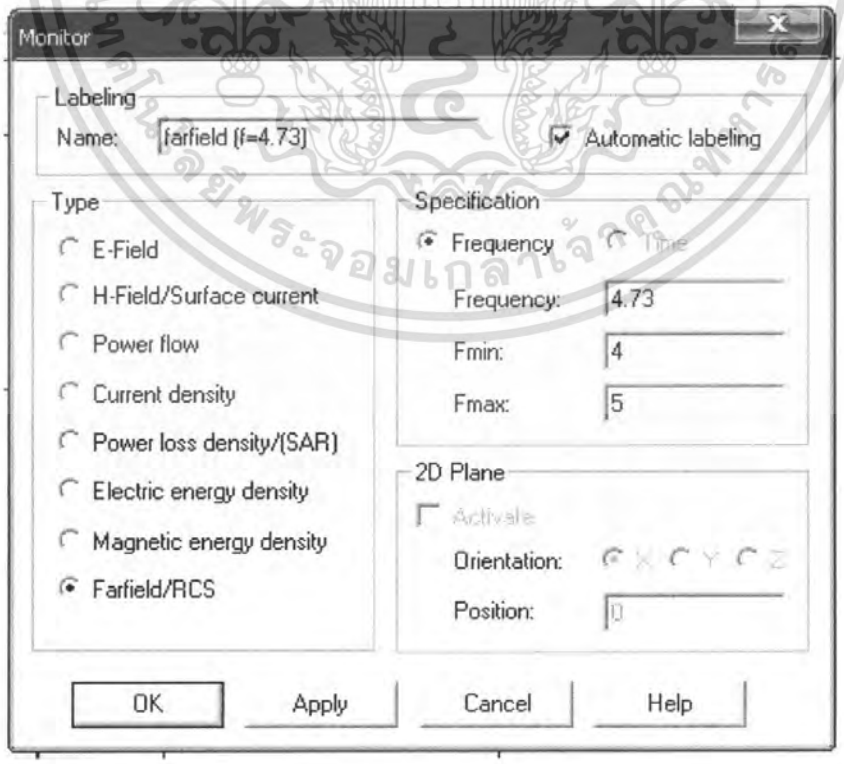
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดช่องทางหารป้อนสัญญาณดังรูปที่ 3.23



รูปที่ 3.23 ช่องทางการป้อนคลื่น

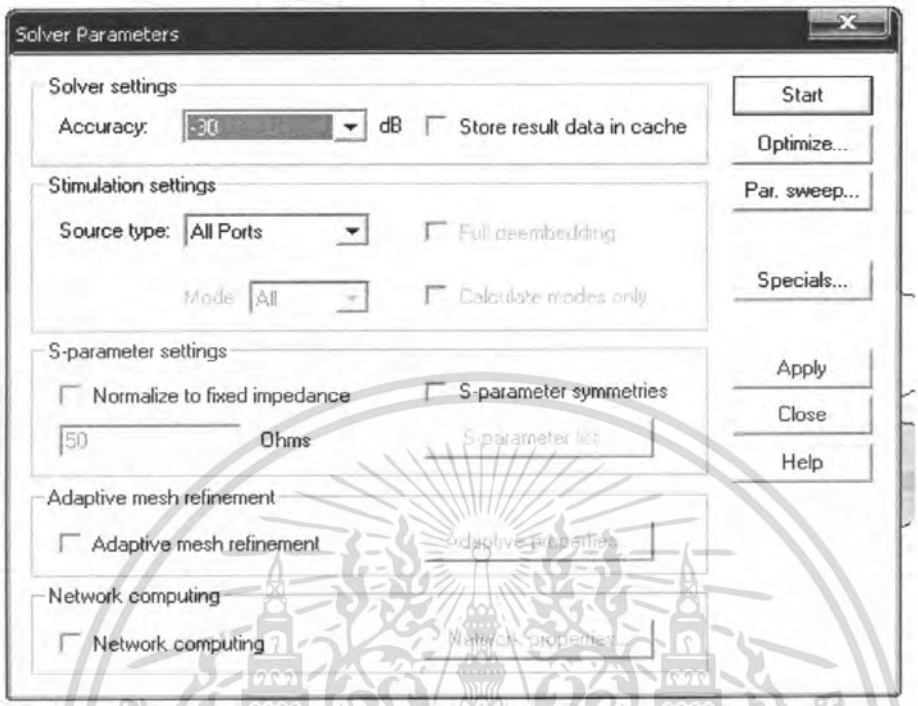
กำหนดความถี่ที่เราต้องการดูลักษณะการส่งผ่านในแต่ละช่องสัญญาณ ดังรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 กำหนดความถี่ที่ต้องการดูลักษณะการส่งผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการวิเคราะห์โดยใช้คำสั่ง Transient Solver Parameter ดังรูปที่ 3.25

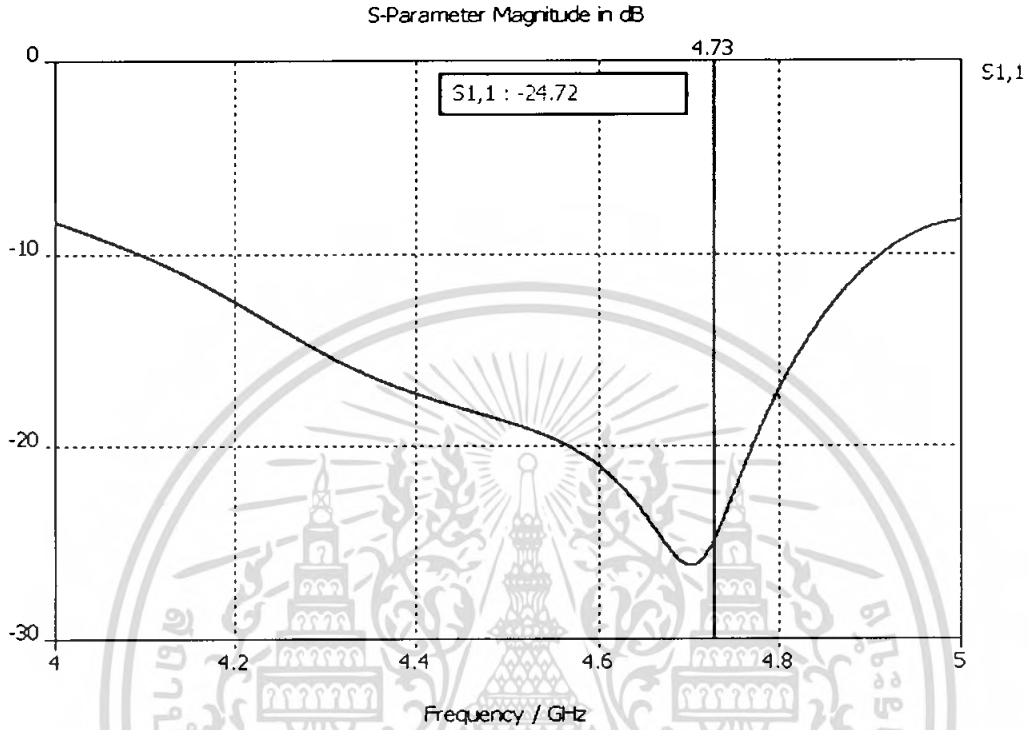


รูปที่ 3.25 การวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศเฮลิคอล

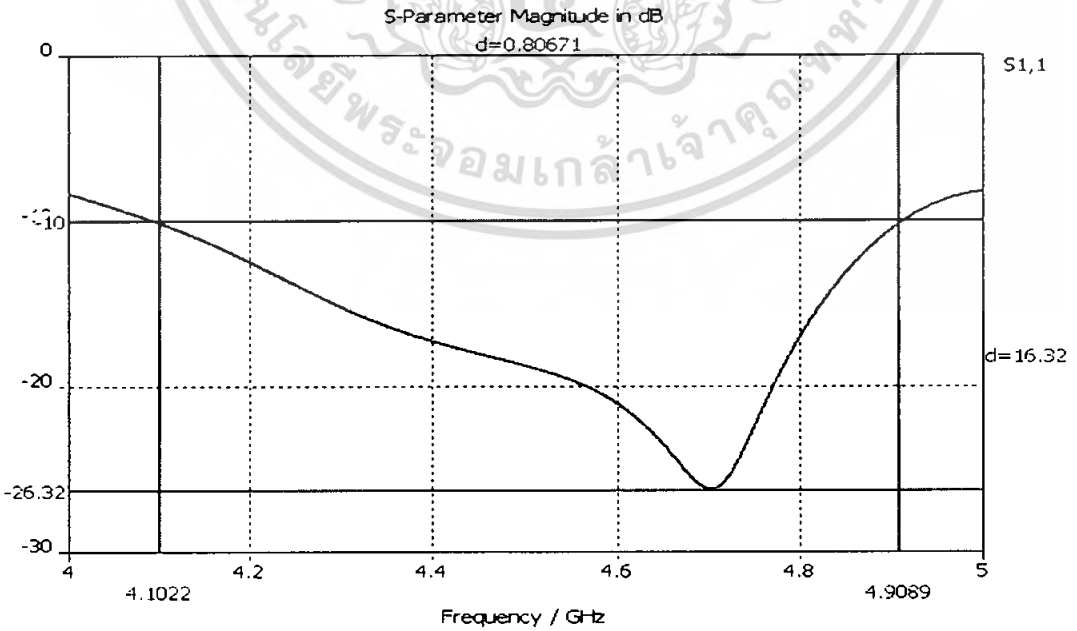
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 ผลการวิเคราะห์จากโปรแกรม CST ของสายอากาศเฮลิคอลที่ความถี่กลาง 4.73 GHz

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของสายอากาศเฮลิคอลย่านความถี่ 4.73 GHz นั้นจะอยู่ในรูปของกราฟคุณลักษณะโดยจะดูกราฟคุณลักษณะของค่าพารามิเตอร์ S_{11} (Return Loss) หน่วยเป็น dB เพื่อให้ได้คุณสมบัติของสายอากาศตามที่ต้องการดังรูปที่ 3.26



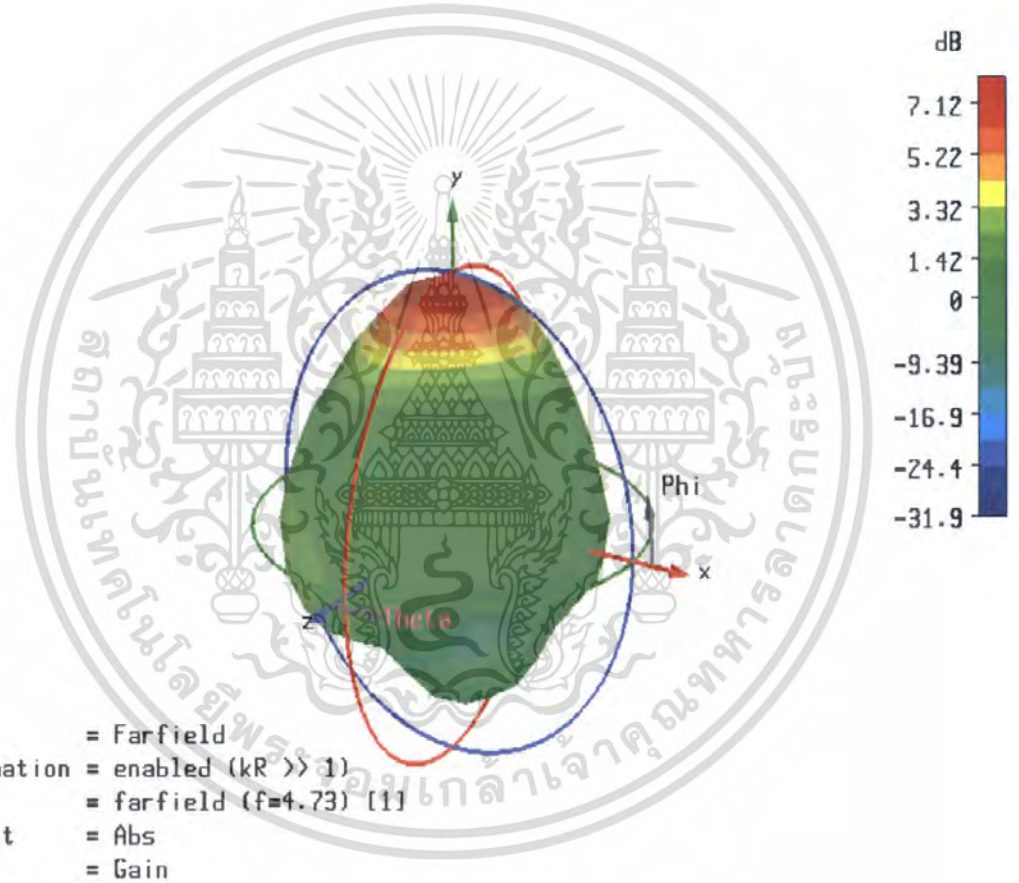
รูปที่ 3.26 (ก) กราฟคุณลักษณะของ S_{11}



รูปที่ 3.26 (ข) กราฟคุณลักษณะของ S_{11}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

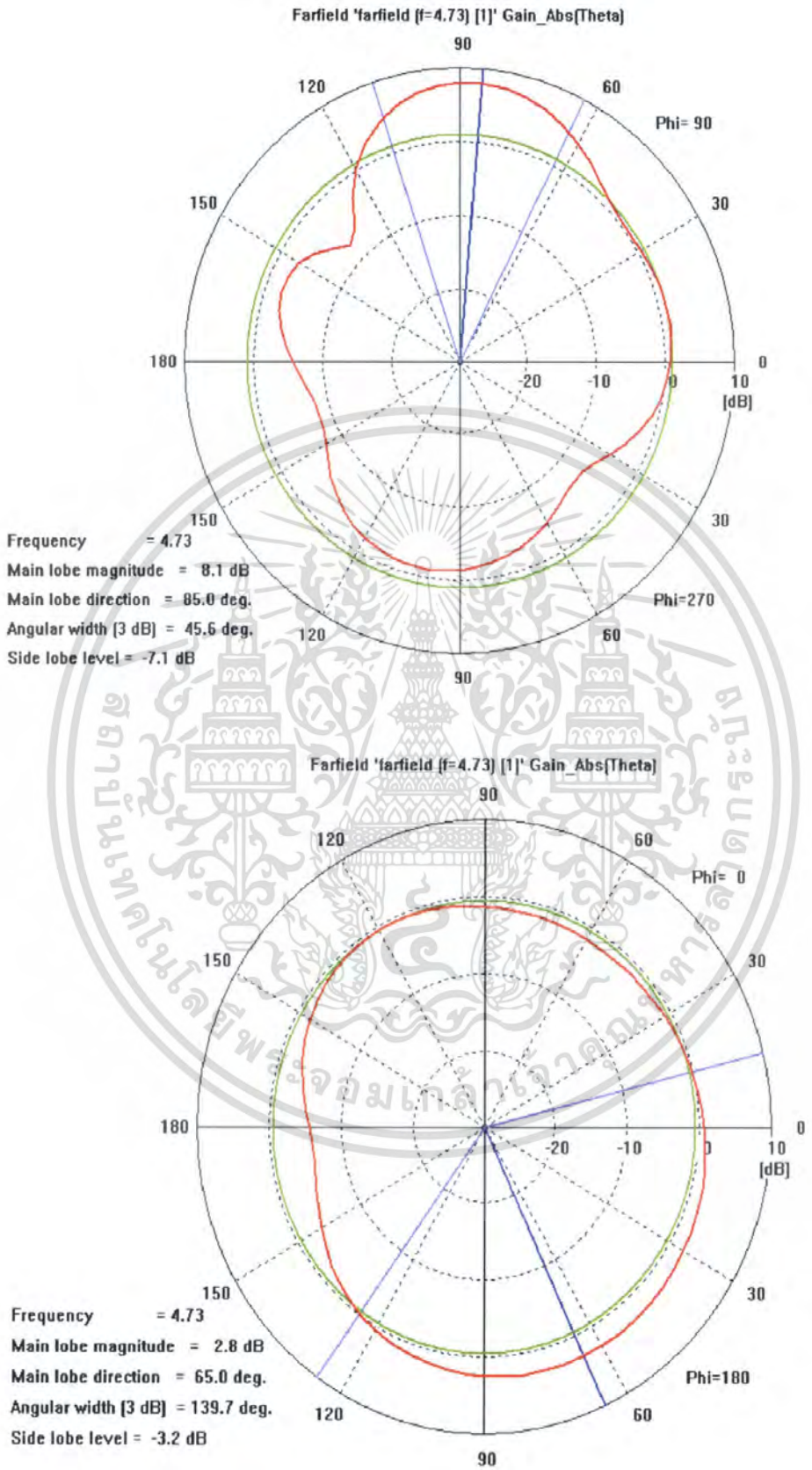
จากรูปที่ 3.26 เป็นกราฟคุณลักษณะของ Return Loss ที่ความถี่ 4.73 GHz ที่ได้จากโครงสร้างของสายอากาศเฮลิคอลตามที่ได้ออกแบบไว้มี Return Loss ที่ -24.72 dB จากสูตร $VSWR = \frac{1+|s_{11}|}{1-|s_{11}|}$ ทำให้ได้ VSWR เท่ากับ 1: 1.12 และจากสูตร $VSWR = \frac{1+\sqrt{\frac{p_{ref}}{p_{in}}}}{1-\sqrt{\frac{p_{ref}}{p_{in}}}}$ ทำให้ได้พลังงานสะท้อนกลับเป็น 0.32 % มีแบนด์วิดท์ 806 MHz และ %แบนด์วิดท์ เท่ากับ 17.05 % มีค่า Gain = 8.07 dB




```
Type          = Farfield
Approximation = enabled (kR >> 1)
Monitor       = farfield (f=4.73) [1]
Component     = Abs
Output        = Gain
Frequency     = 4.73
Rad. effic.   = 0.9997
Tot. effic.   = 0.9963
Gain          =  8.070 dB
```

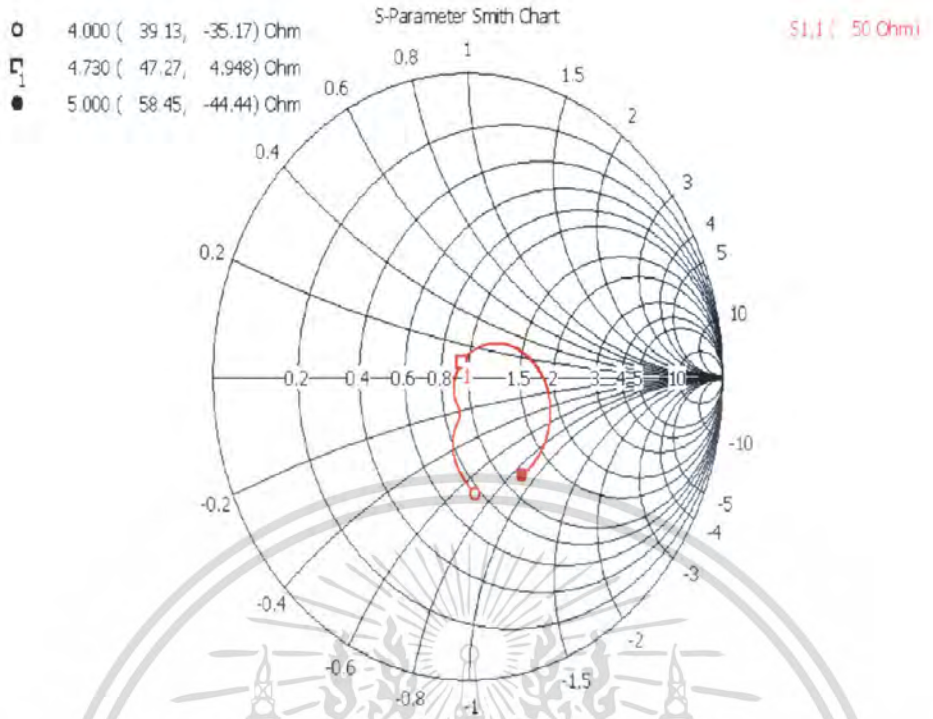
รูปที่ 3.27(ก) Farfield ของสายอากาศเฮลิคอลที่จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CST

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27(ข) Farfield ของสายอากาศเฮลิคอลที่จำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CST

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.28 Smith chart สายอากาศเฮลิคอลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CST

3.5.3 สรุปผลการวิเคราะห์สายอากาศเฮลิคอล

ผลการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎี และโปรแกรม CST จึงทำให้ได้ขนาดของโครงสร้างและคุณสมบัติ ซึ่งสรุปได้ว่า การจำลองโครงสร้างและการทำงานด้วยโปรแกรม CST นั้นได้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ค่อนข้างใกล้เคียงกับที่คำนวณไว้ และสายอากาศที่ได้ออกแบบไว้สามารถรับสัญญาณที่ความถี่ 4.73 GHz ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

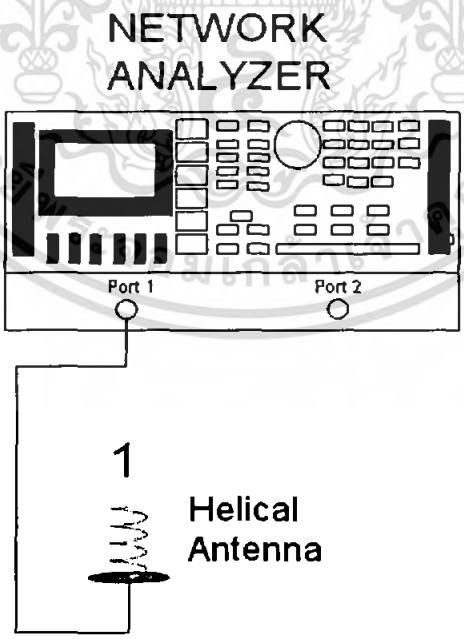
ผลการทดสอบและผลการทดลอง

4.1 การทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer)

เครื่องวิเคราะห์โครงข่ายมีหลักการทำงานคือ ภายในตัวเครื่องนั้นจะประกอบด้วยเครื่องรับและเครื่องส่ง เราจึงสามารถที่จะกำหนดได้ว่าต้องการพอร์ตใดเป็นเครื่องส่งและเครื่องรับโดยที่หน่วยในการวัดนั้นนิยมวัดเป็น dB ในการทดสอบคุณสมบัติต่างๆของไยบริดริงนั้น คุณสมบัติที่สำคัญคือ S_{21} (Insertion – Loss) ส่วนของสายอากาศเฮลิคอลนั้นจะดูที่ S_{11} (Return – Loss) อัตราการสูญเสียย้อนกลับแพทเทอร์น และ Gain ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่เราให้ความสนใจในการที่จะใช้เป็นตัวตัดสินว่าอุปกรณ์ชนิดนั้นๆมีคุณสมบัติที่ดีตามข้อกำหนดที่เราต้องการหรือไม่ โดยที่คุณลักษณะเหล่านี้เป็นสิ่งที่จำเป็น แต่เราก็ต้องคำนึงถึงคุณลักษณะที่สำคัญอีกประการหนึ่งซึ่งก็คืออิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์นั้นๆ ซึ่งค่าที่เหมาะสมและยอมรับได้ก็ควรจะมีค่าใกล้เคียง 50 โอห์ม มากที่สุดเพื่อลดอัตราการสูญเสียพลังงานให้ได้มากที่สุด

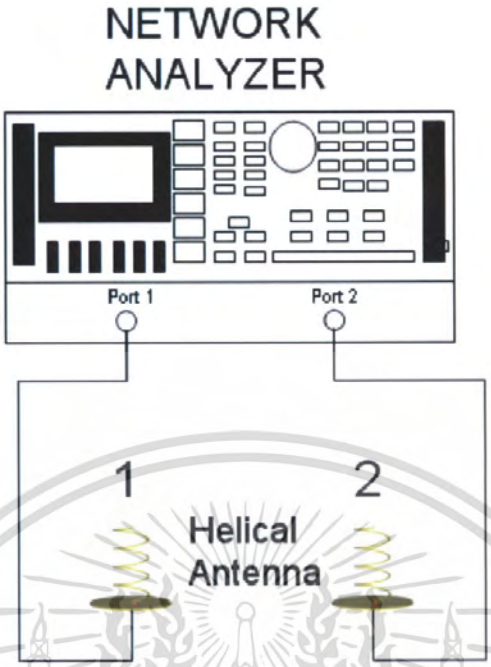
4.2 การทดสอบอัตราการสูญเสียย้อนกลับ ค่าอิมพีแดนซ์ และค่าแพทเทอร์นของสายอากาศเฮลิคอล (Return Loss , Impedance , Radiation pattern)

ในการส่งผ่านพลังงานในสายอากาศนั้น จะมีอัตราการสูญเสียย้อนกลับและ แพทเทอร์นการกระจายคลื่น ในการทดสอบนี้เป็นการทดสอบสายอากาศเฮลิคอล ที่มีความถี่กลางเท่ากับ 4.73 GHz มีการต่ออุปกรณ์ดังรูป



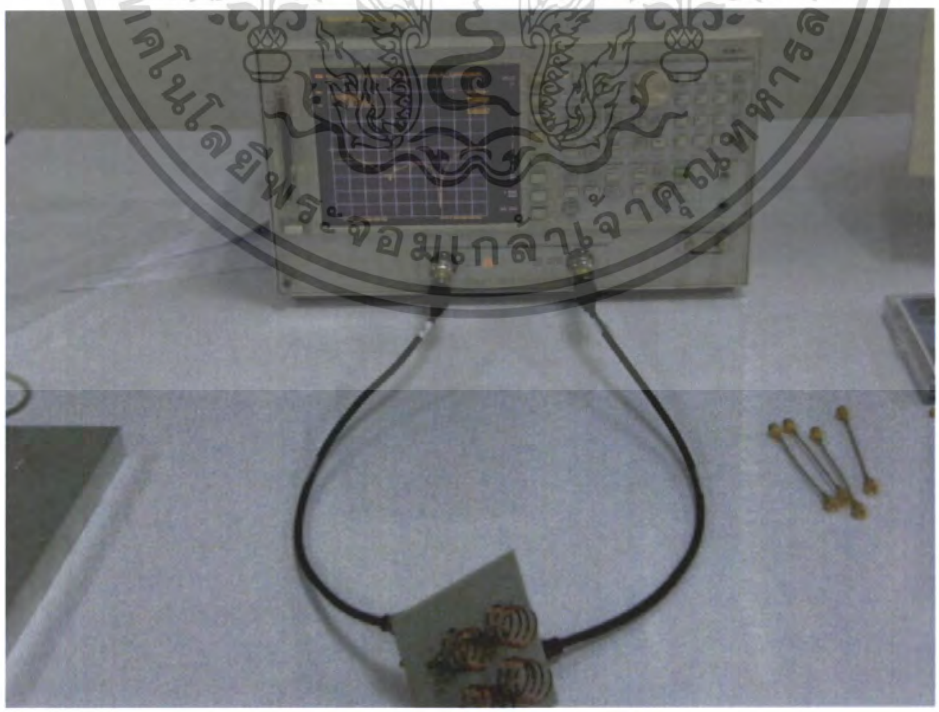
รูปที่ 4.1 การต่ออุปกรณ์การทดสอบ Return Loss , Impedance ของสายอากาศเฮลิคอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 การต่ออุปกรณ์การทดสอบ Gain และ pattern ของสายอากาศเฮลิคอล

การทดสอบสายอากาศเฮลิคอลที่ความถี่กลาง 4.73 GHz

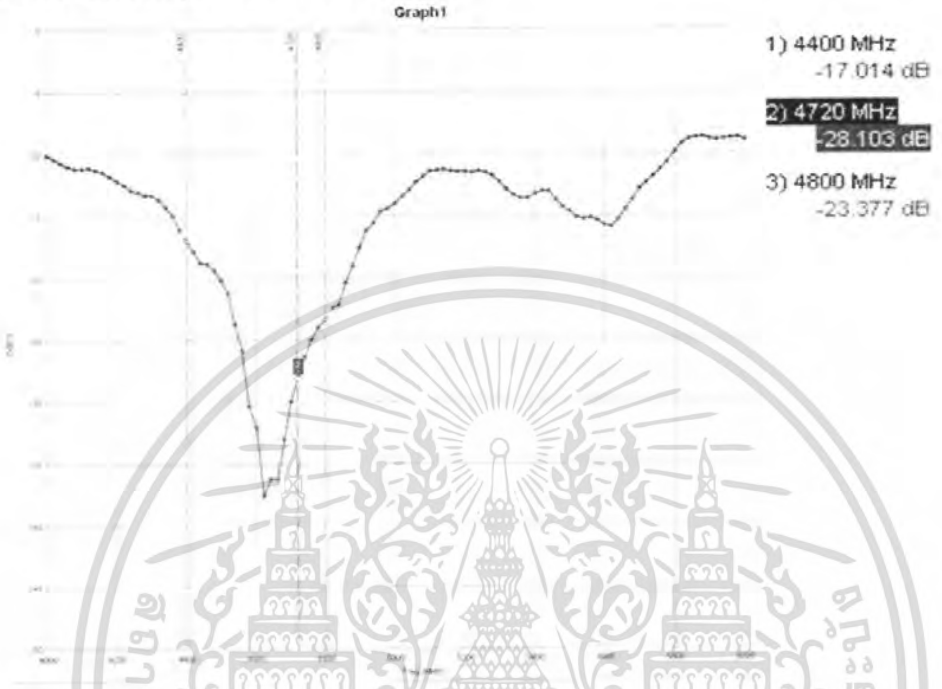


รูปที่ 4.3 แสดงการทดสอบการวัดค่า Return Loss , Impedance ของสายอากาศเฮลิคอล

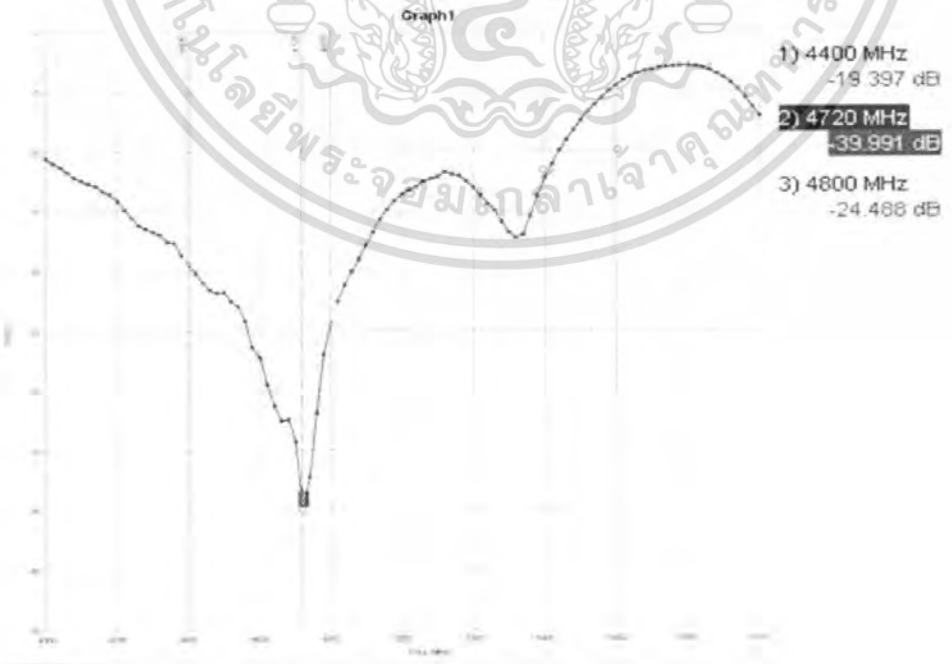
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 การทดสอบอัตราการสูญเสียย้อนกลับอิมพีแดนซ์ และvswrของสายอากาศเฮลิคอลที่ความถี่ 4.73 GHz

เมื่อทำการทดสอบโดยต่ออุปกรณ์การทดสอบตามรูปที่ 4.3 เพื่อทดสอบคุณสมบัติต่างๆของสายอากาศเราจะได้กราฟคุณสมบัติต่างๆดังนี้

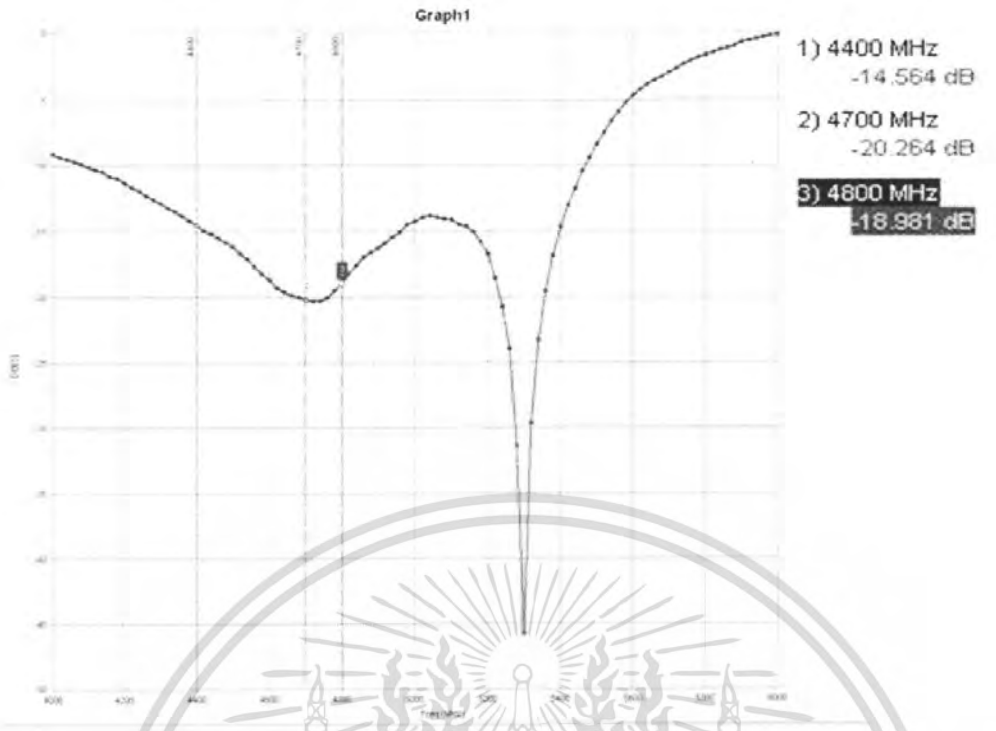


รูปที่ 4.4 (ก) กราฟแสดงคุณสมบัติการสูญเสียย้อนกลับ Return Loss ของสายอากาศเฮลิคอลตัวที่ 1

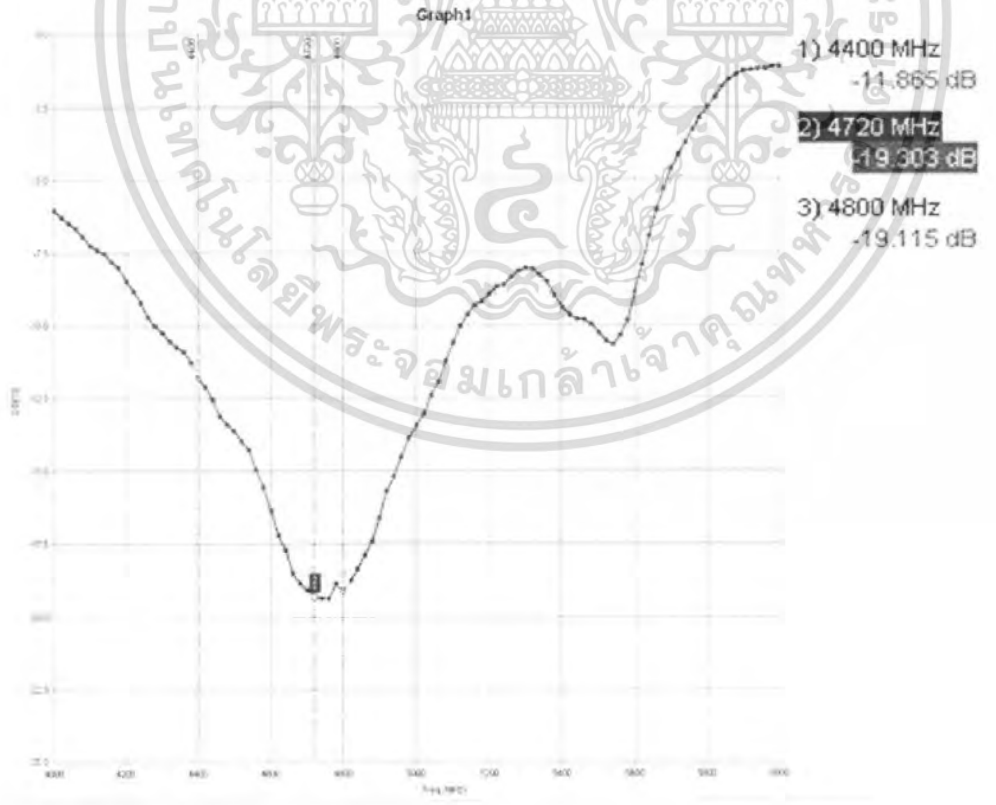


รูปที่ 4.4 (ข) กราฟแสดงคุณสมบัติการสูญเสียย้อนกลับ Return Loss ของสายอากาศเฮลิคอลตัวที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



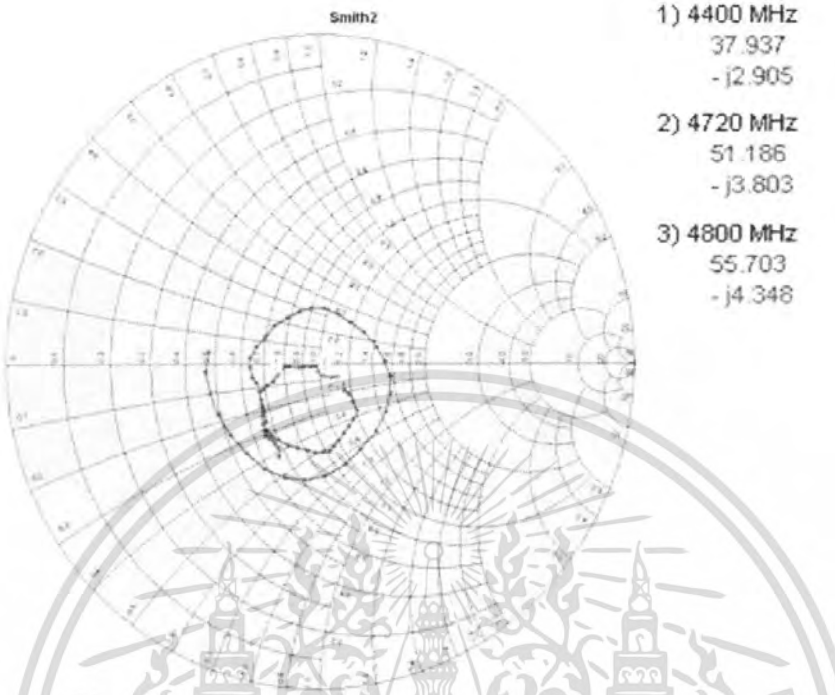
รูปที่ 4.4 (ค) กราฟแสดงคุณสมบัติการสูญเสียย้อนกลับ Return Loss ของสายอากาศเฮลิคอลตัวที่ 3



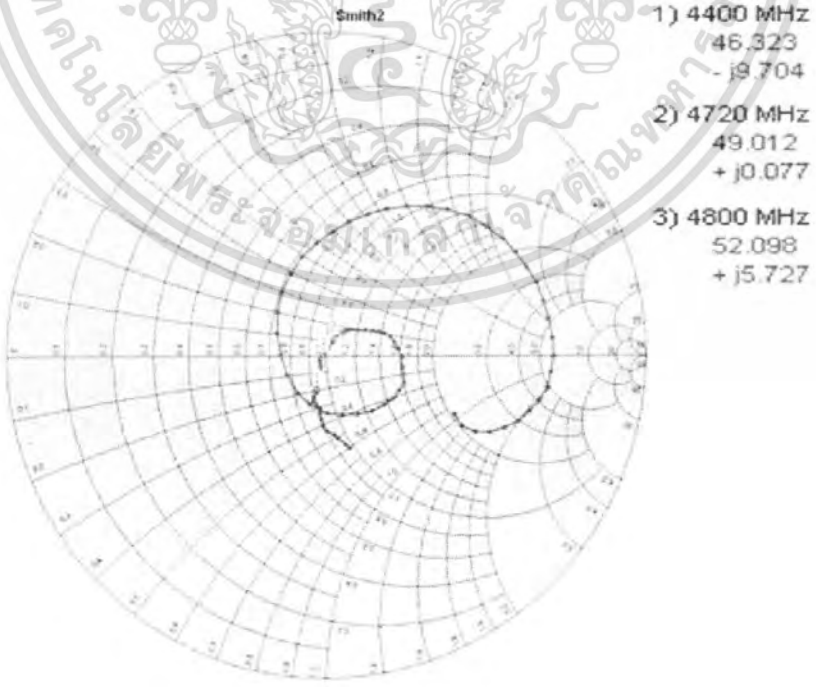
รูปที่ 4.4 (ง) กราฟแสดงคุณสมบัติการสูญเสียย้อนกลับ Return Loss ของสายอากาศเฮลิคอลตัวที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงคุณสมบัติเชิงอิมพีแดนซ์

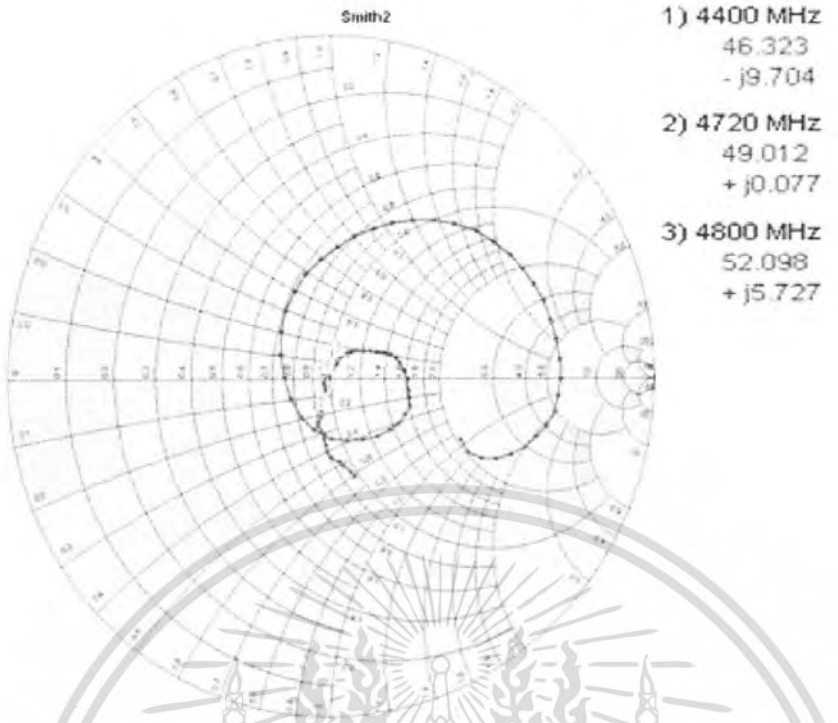


รูปที่ 4.5 (ก) กราฟแสดงคุณสมบัติเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเฮลิคอลตัวที่ 1

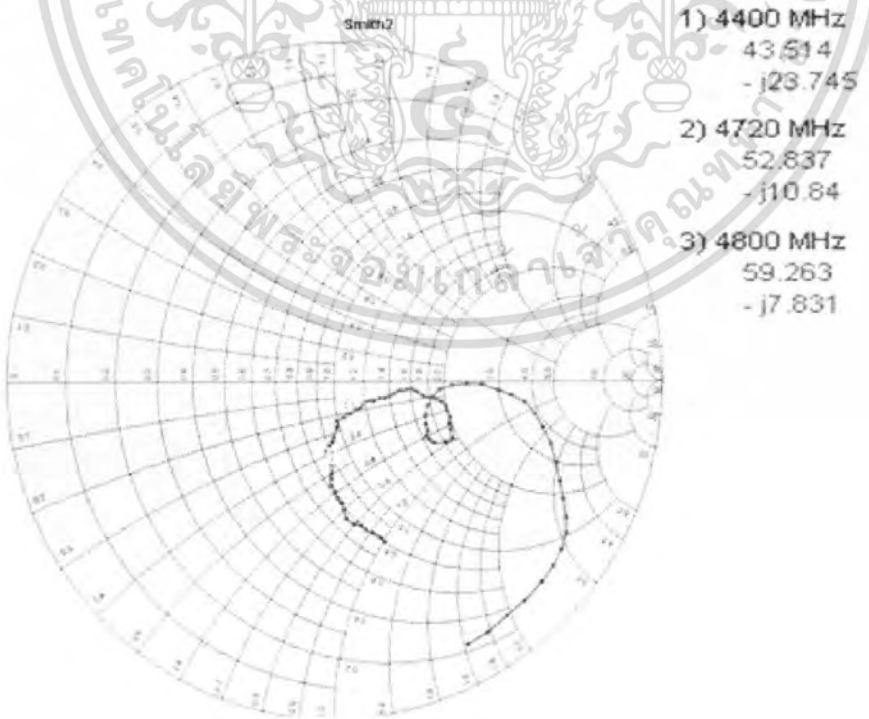


รูปที่ 4.5 (ข) กราฟแสดงคุณสมบัติเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเฮลิคอลตัวที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



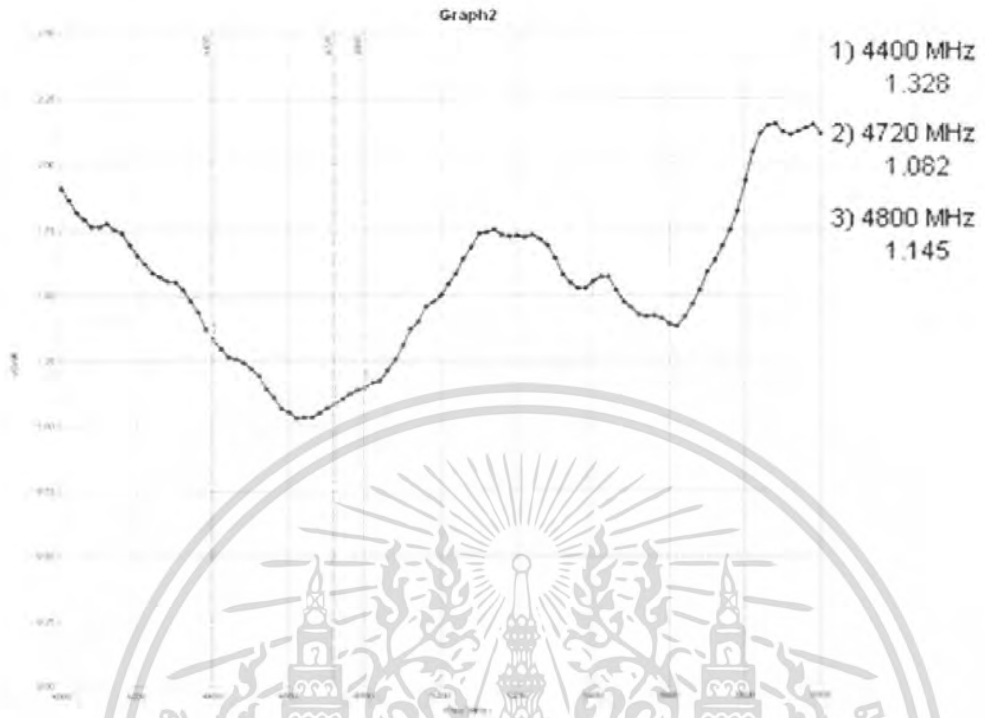
รูปที่ 4.5 (ค) กราฟแสดงคุณสมบัติเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเฮลิคอลตัวที่ 3



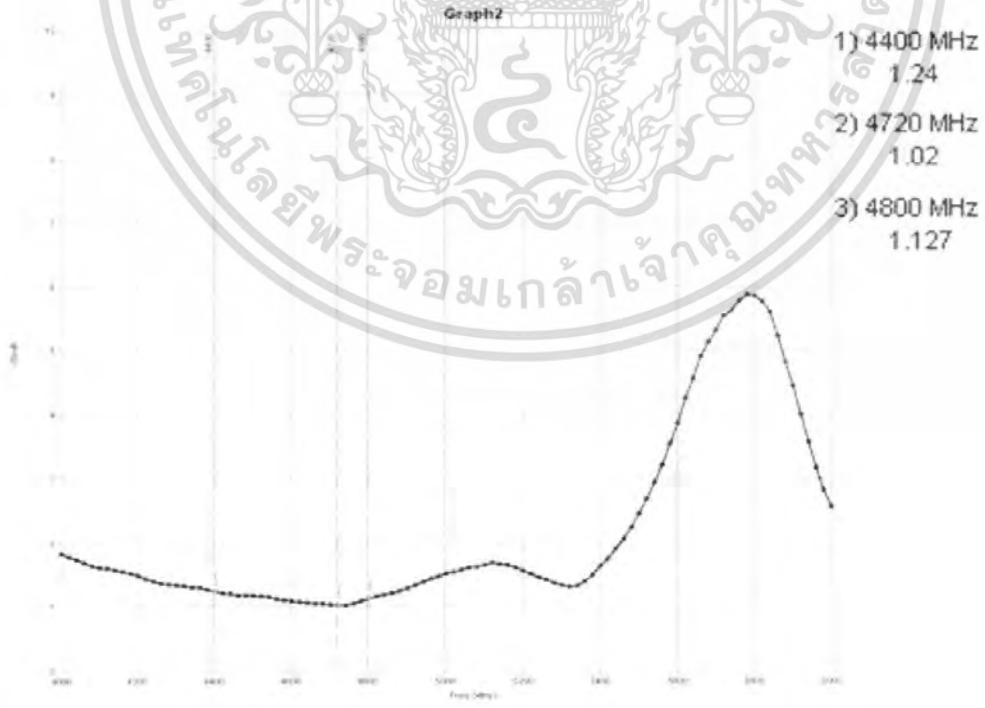
รูปที่ 4.5 (ง) กราฟแสดงคุณสมบัติเชิงอิมพีแดนซ์ของสายอากาศเฮลิคอลตัวที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงคุณสมบัติ VSWR

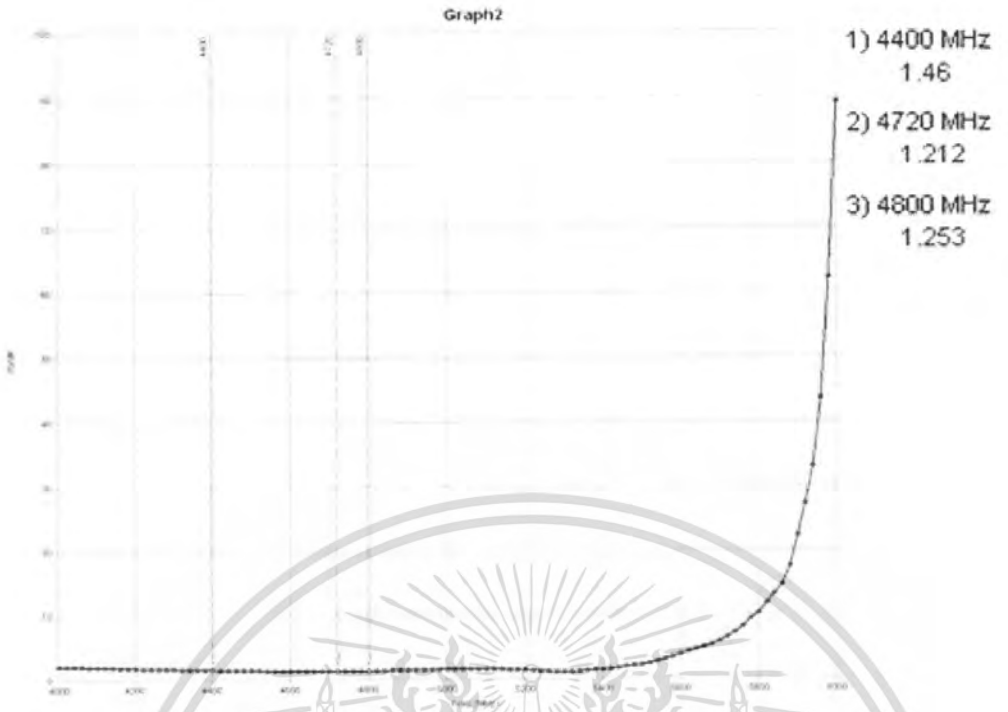


รูปที่ 4.6 (ก) กราฟแสดงคุณสมบัติ VSWR ของสายอากาศเฮลิคอลตัวที่ 1

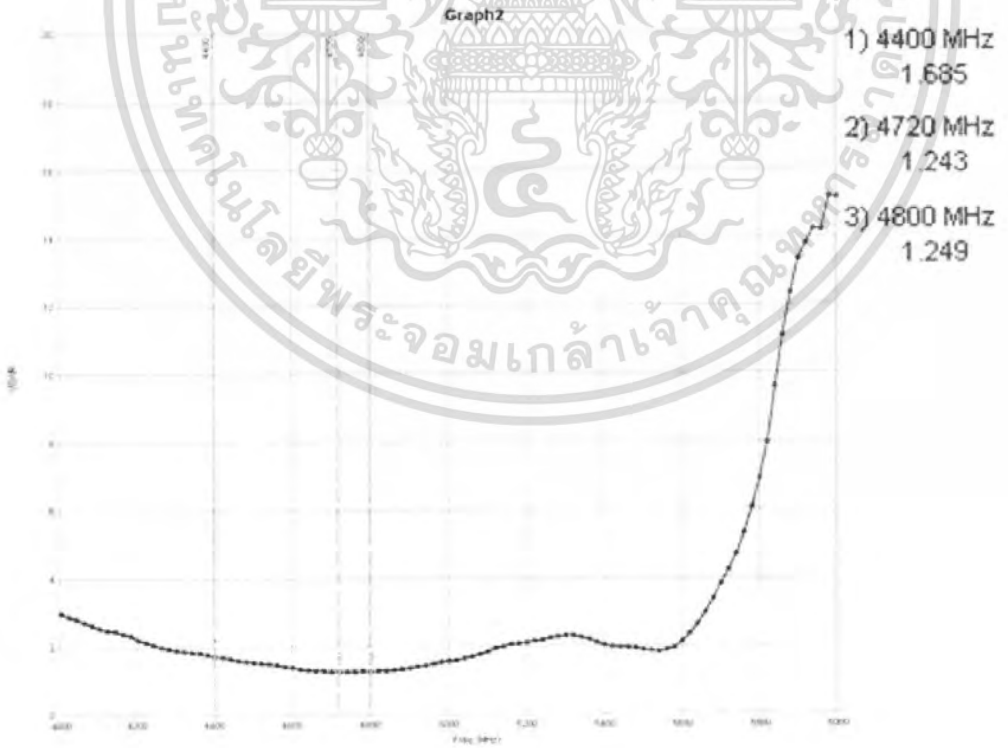


รูปที่ 4.6 (ข) กราฟแสดงคุณสมบัติ VSWR ของสายอากาศเฮลิคอลตัวที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



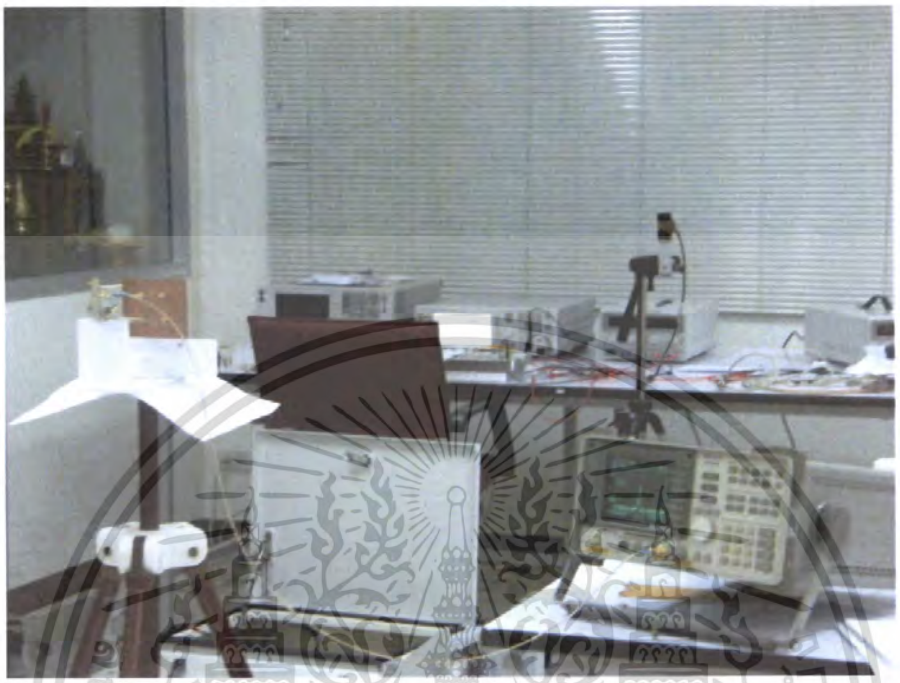
รูปที่ 4.6 (ค) กราฟแสดงคุณสมบัติ VSWR ของสายอากาศเฮลิคอลตัวที่ 3



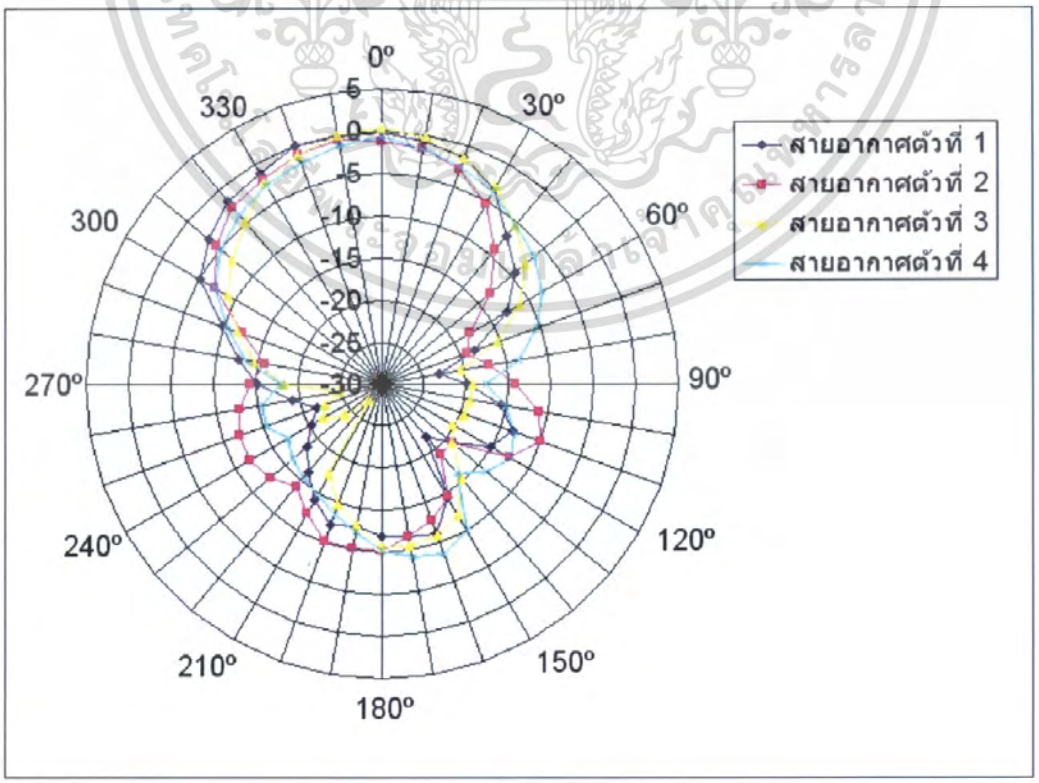
รูปที่ 4.6 (ง) กราฟแสดงคุณสมบัติ VSWR ของสายอากาศเฮลิคอลตัวที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การทดสอบ Gain และ Pattern ของสายอากาศเฮลิคอลที่ความถี่ 4.73 GHz



รูปที่ 4.7 การทดสอบการวัดค่า Pattern และค่า Gain ของสายอากาศเฮลิคอล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8 แสดงคุณสมบัติ Pattern ของสายอากาศเฮลิคอลทั้ง 4 ตัว

Gain ของสายอากาศที่วัดที่ระยะห่าง 0.2 m จากสูตร $Gain = \frac{S_{21} - 20\log(\frac{\lambda}{4\pi R})}{2}$ (4.1)

ที่ความถี่ 4.73 GHz ได้ค่า สายอากาศตัวที่ 1 ได้ S_{21} ที่ -15.802 dB

ที่ความถี่ 4.73 GHz ได้ค่า สายอากาศตัวที่ 2 ได้ S_{21} ที่ -17.817dB

ที่ความถี่ 4.73 GHz ได้ค่า สายอากาศตัวที่ 3 ได้ S_{21} ที่ -19.312 dB

ที่ความถี่ 4.73 GHz ได้ค่า สายอากาศตัวที่ 4 ได้ S_{21} ที่ -18.177dB

ที่ความถี่ 4.73 GHz มี $\lambda = 0.06342$ m

เมื่อ R คือระยะห่างระหว่างสายอากาศส่งและสายอากาศรับเท่ากับ 0.2 เมตร

จากการคำนวณตามสมการที่ 4.1

ได้ Gain ของสายอากาศตัวที่ 1 เท่ากับ 8.078 dBi

ได้ Gain ของสายอากาศตัวที่ 2 เท่ากับ 6.569 dBi

ได้ Gain ของสายอากาศตัวที่ 3 เท่ากับ 6.322 dBi

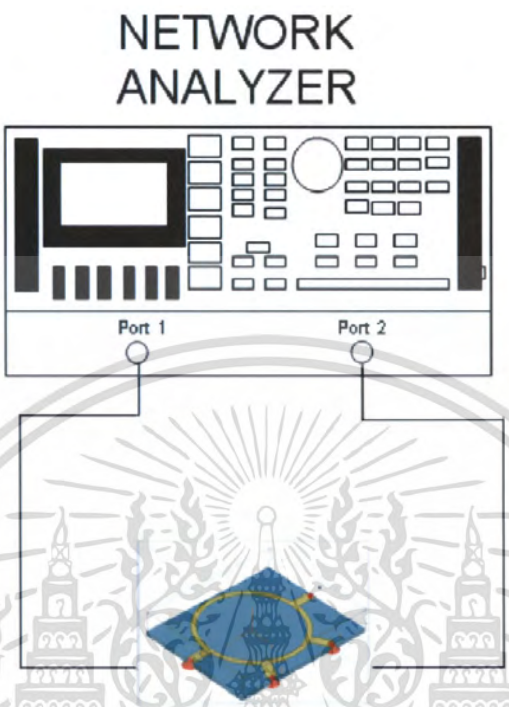
ได้ Gain ของสายอากาศตัวที่ 4 เท่ากับ 6.889 dBi

4.2.3 สรุปผลการทดลองสายอากาศเฮลิคอล

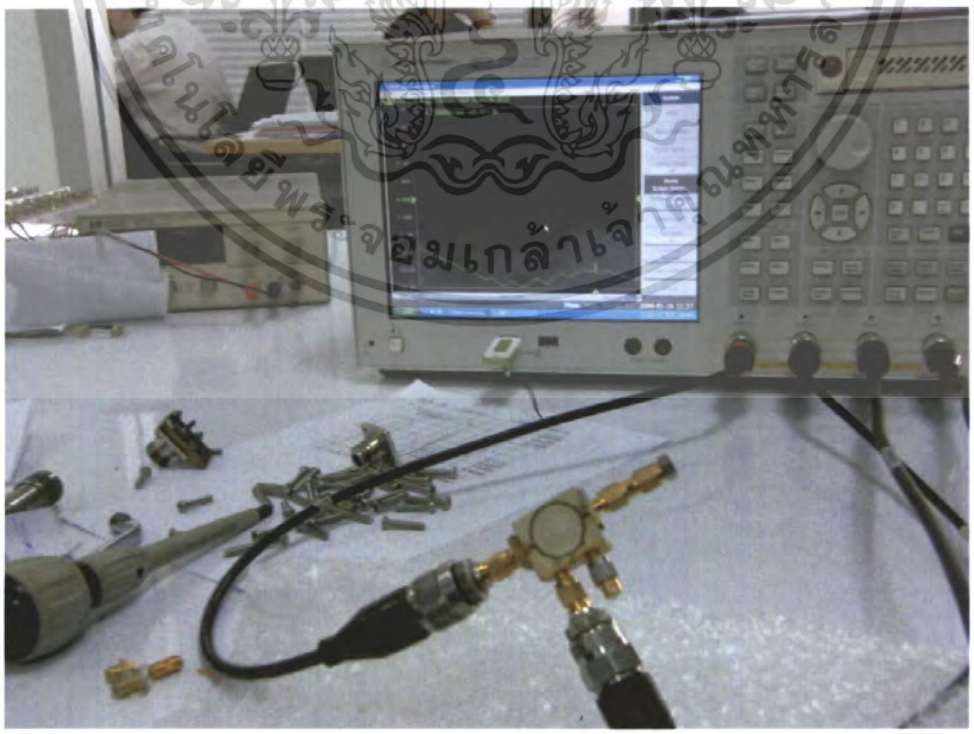
ผลที่ได้จากการทดสอบนั้นได้ค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆค่อนข้างใกล้เคียงกับทฤษฎี และใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CST

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดสอบอัตราส่งผ่าน และเฟส ของ Hybrid Ring Junction ที่ความถี่ 4.73 GHz



รูปที่ 4.9 การต่ออุปกรณ์การทดสอบอัตราการส่งผ่าน และเฟสของ Hybrid Ring Juction

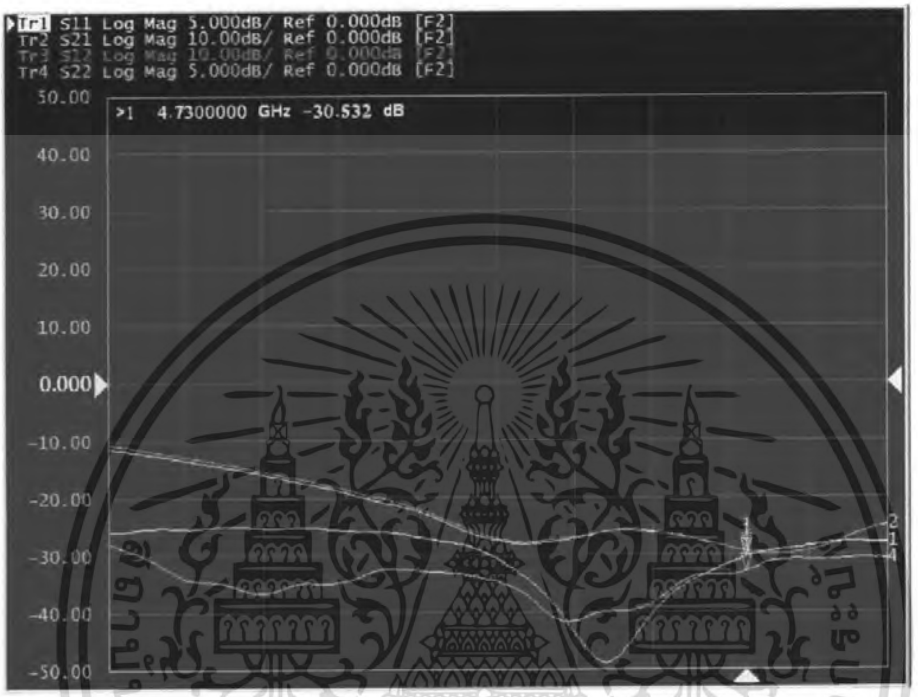


รูปที่ 4.10 แสดงการทดสอบอัตราการส่งผ่าน และเฟสของ Hybrid Ring Juction

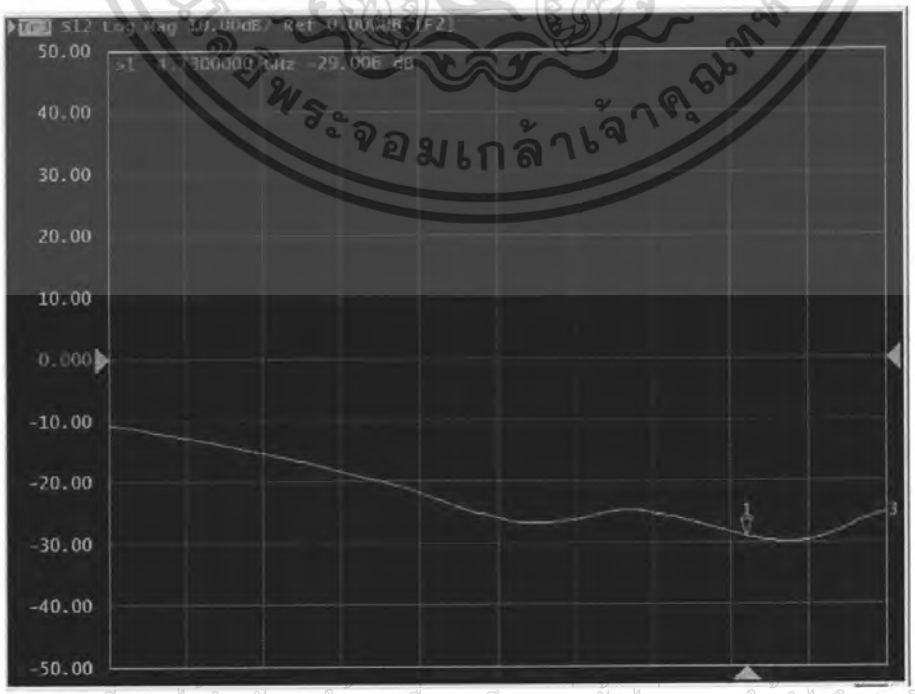
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.1 การทดสอบอัตราการส่งผ่าน และเฟสของ Hybrid Ring Junction ที่ความถี่ 4.73 GHz

เมื่อทำการทดสอบโดยต่ออุปกรณ์การทดสอบตามรูปที่ 4.10 เพื่อทดสอบคุณสมบัติต่างๆของ Hybrid Ring Junction เราจะได้กราฟคุณสมบัติต่างๆดังนี้

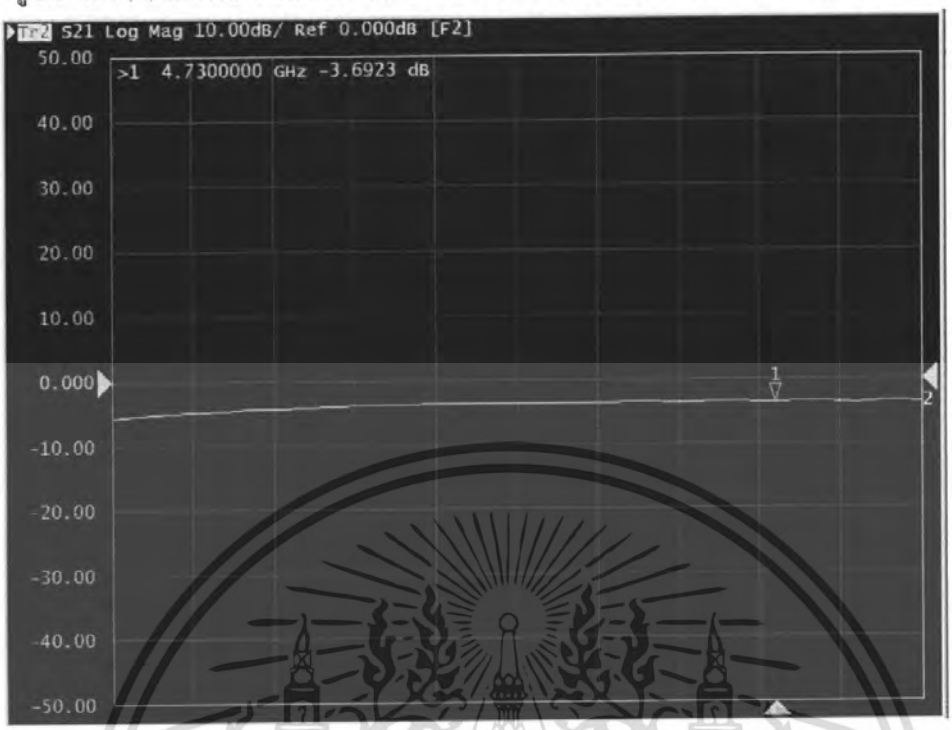


รูปที่ 4.11 (ก) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 1 ได้ -30.532 dB



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

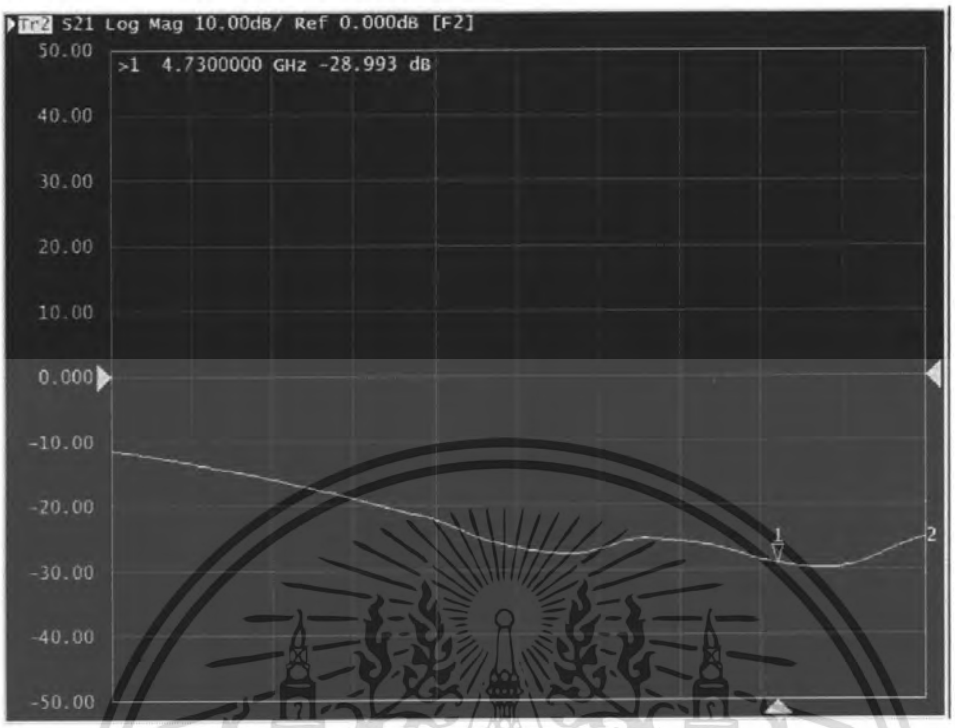
รูปที่ 4.11 (ข) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 1 ได้ -29.006 dB



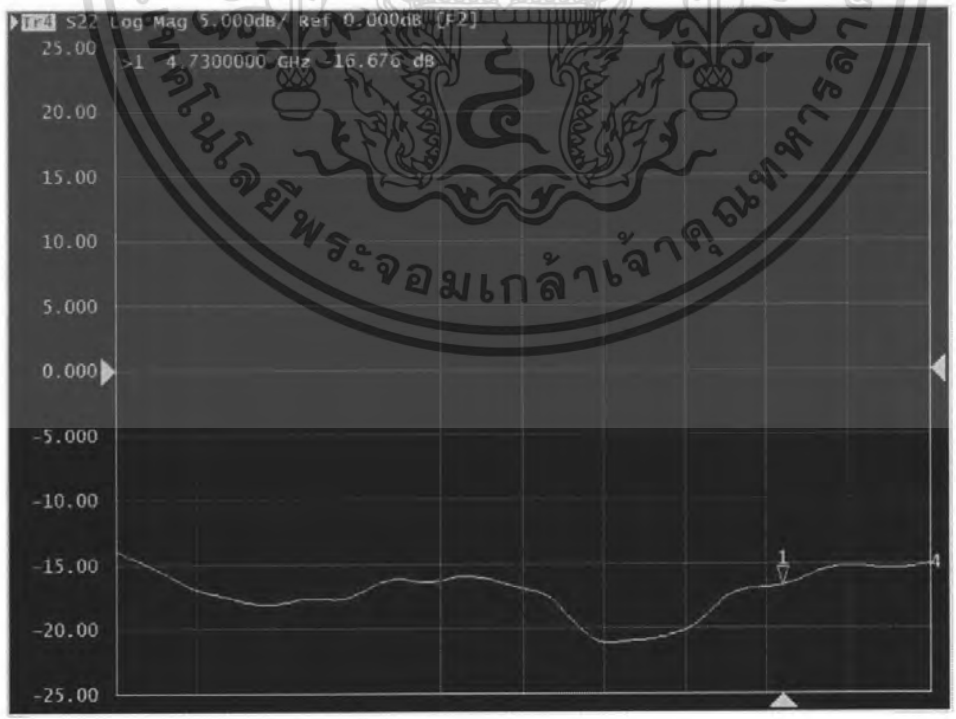
รูปที่ 4.11 (ค) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 1 ได้ 3.6923 dB

รูปที่ 4.11 (ง) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 4 ไปยังพอร์ต 1 ได้ –4.1455 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

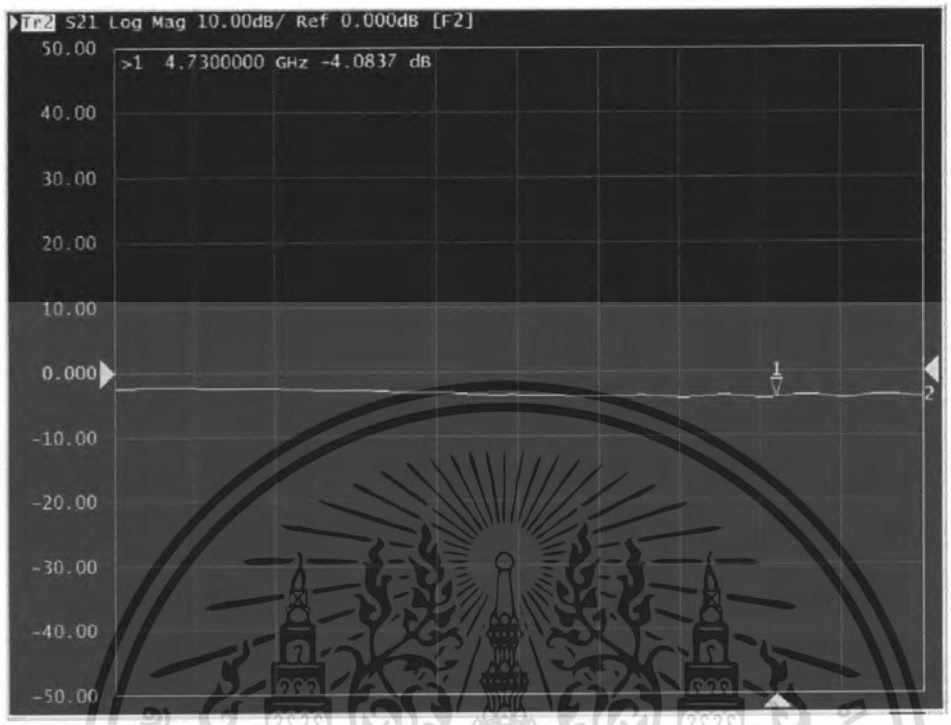


รูปที่ 4.11 (จ) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 2 ได้ -28.993 dB

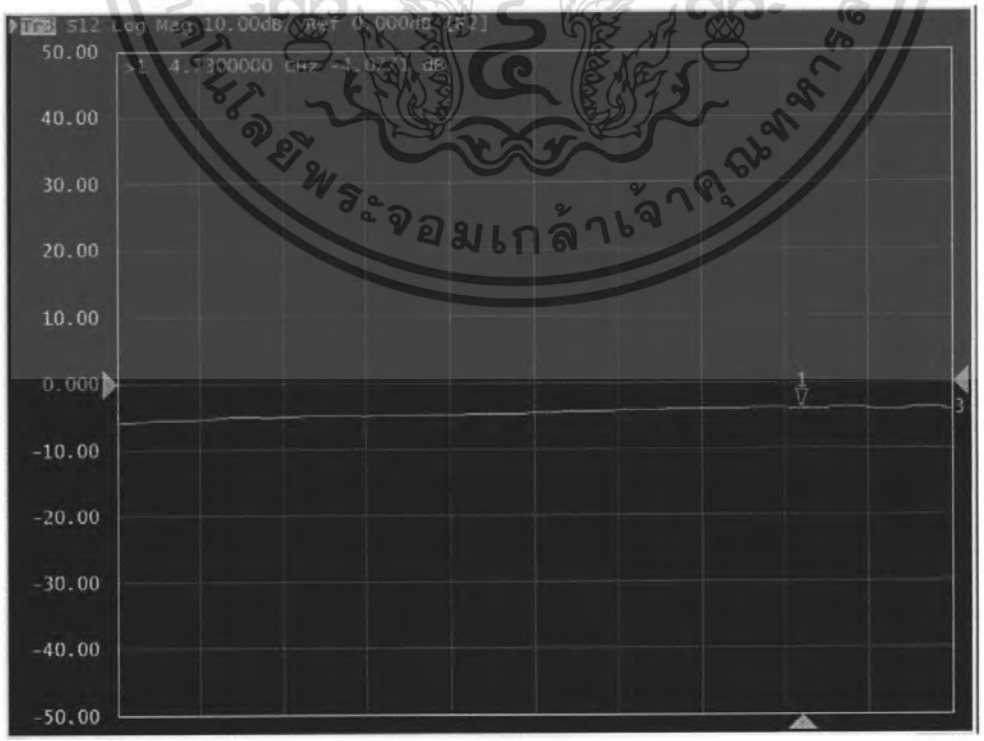


รูปที่ 4.11 (ฉ) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 2 ได้ -16.676 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

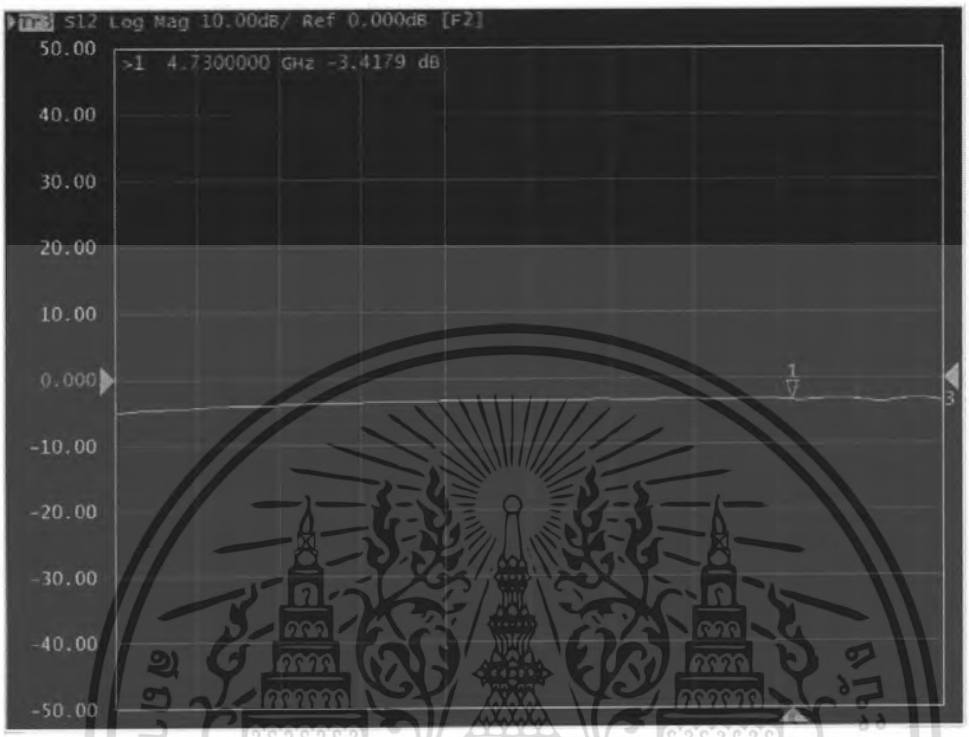


รูปที่ 4.11 (ช) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 2 ได้ -4.0837 dB

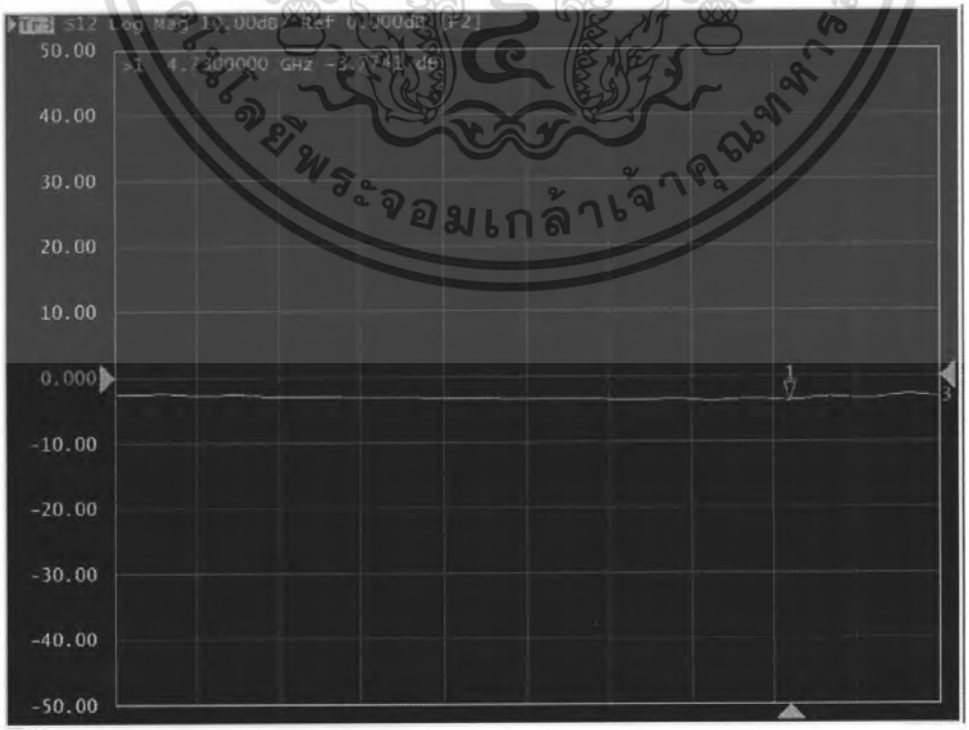


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.11 (ช) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 4 ไปยังพอร์ต 2 ได้ -4.0771 dB

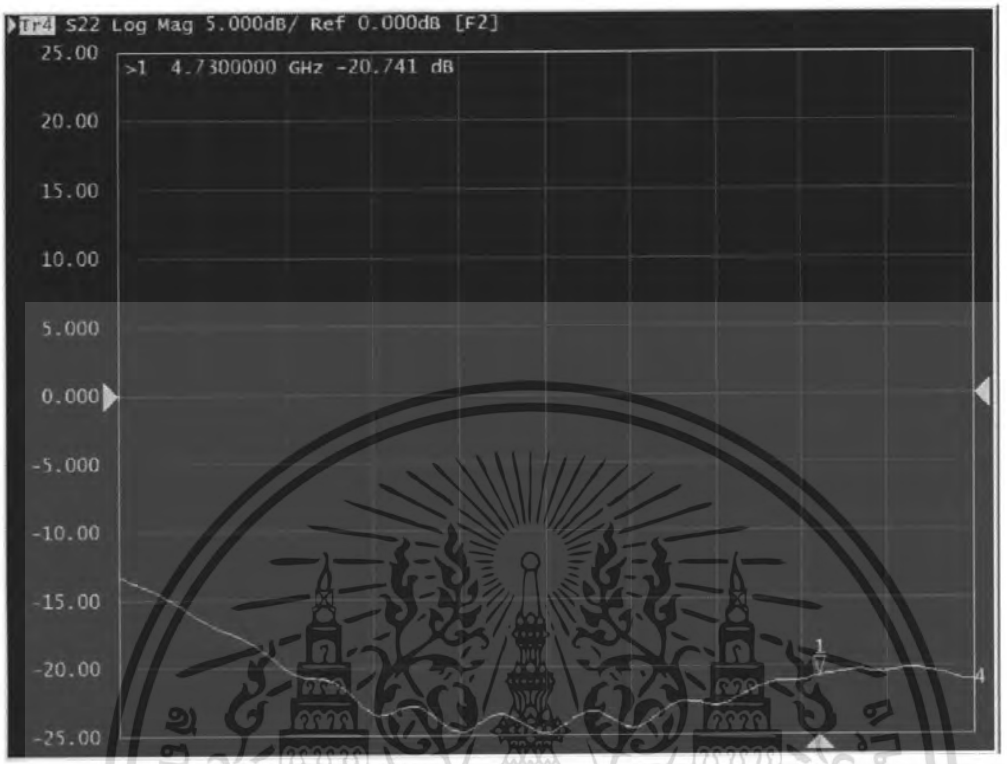


รูปที่ 4.11 (ฌ) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 3 ได้ -3.4179 dB

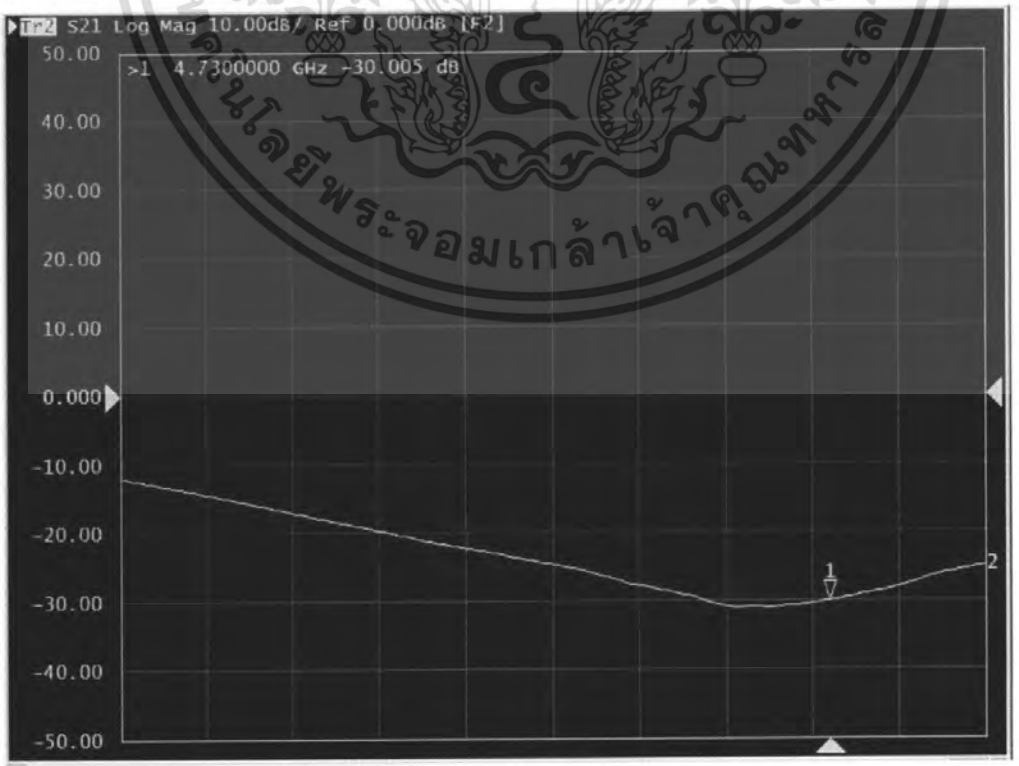


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.11 (ฎ) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 3 ได้ -3.7741 dB

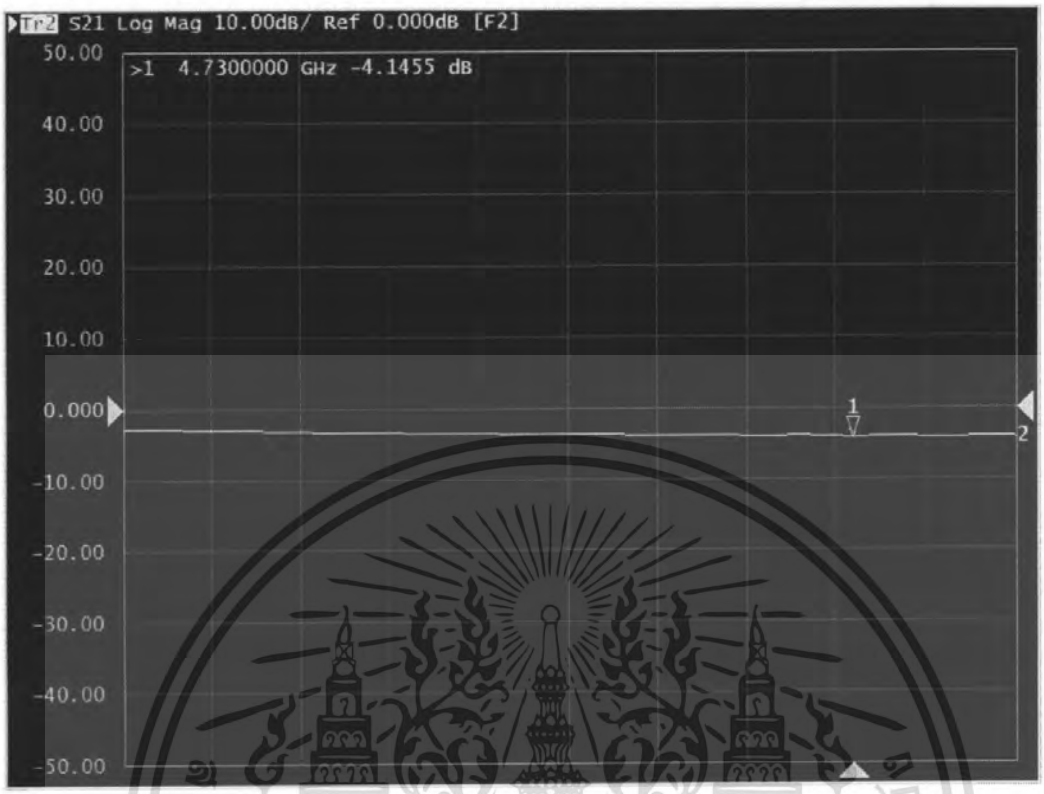


รูปที่ 4.11 (ฏ) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 3 ได้ -20.741 dB

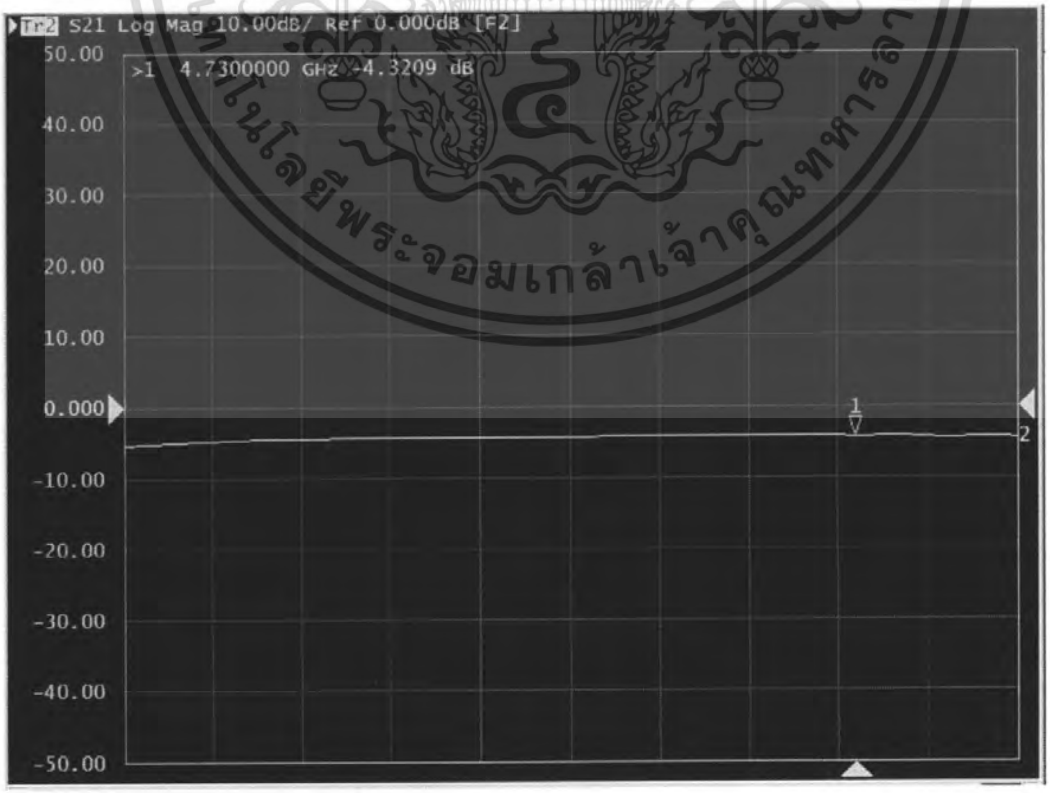


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.11 (ฐ) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 4 ไปยังพอร์ต 3 ได้ -30.005 dB

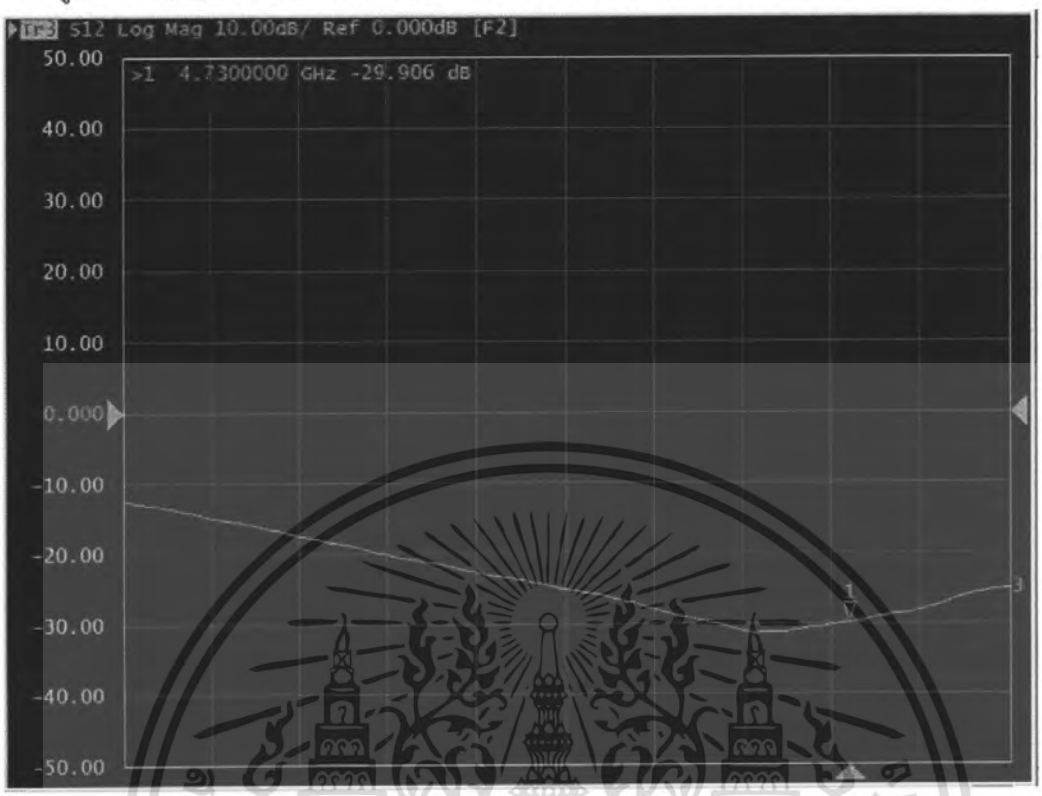


รูปที่ 4.11 (ฑ) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 4 ได้ -4.1455 dB

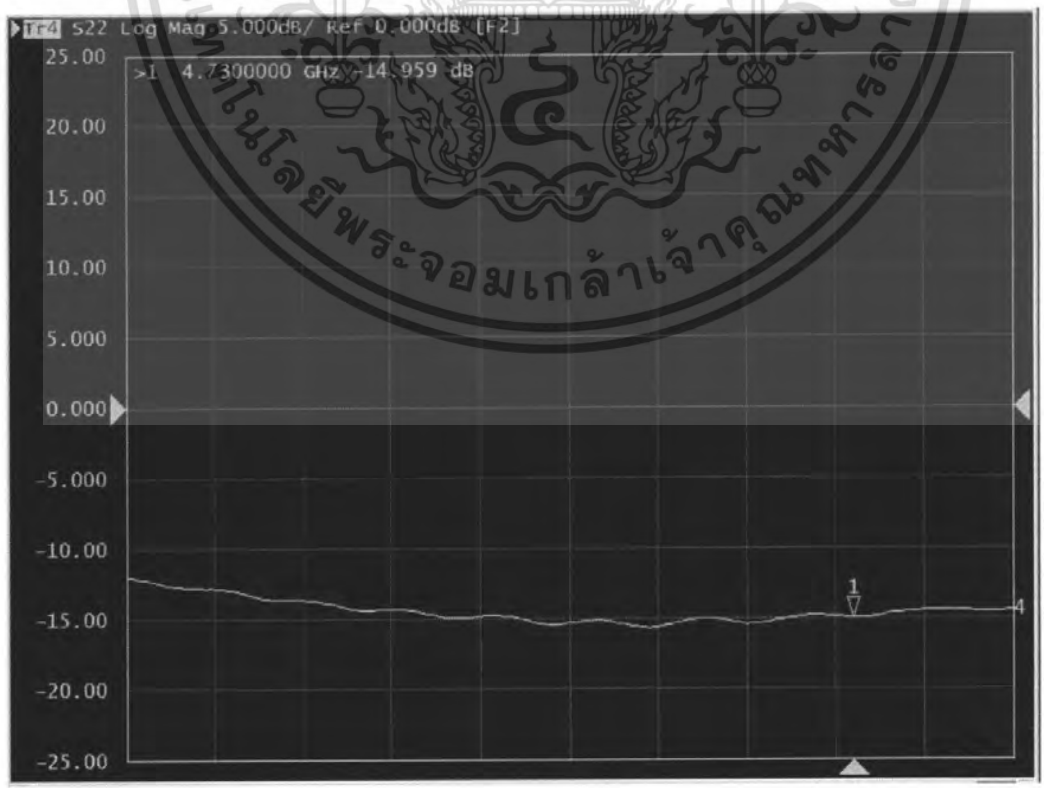


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.11 (ฒ) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 4 ได้ -4.3209 dB

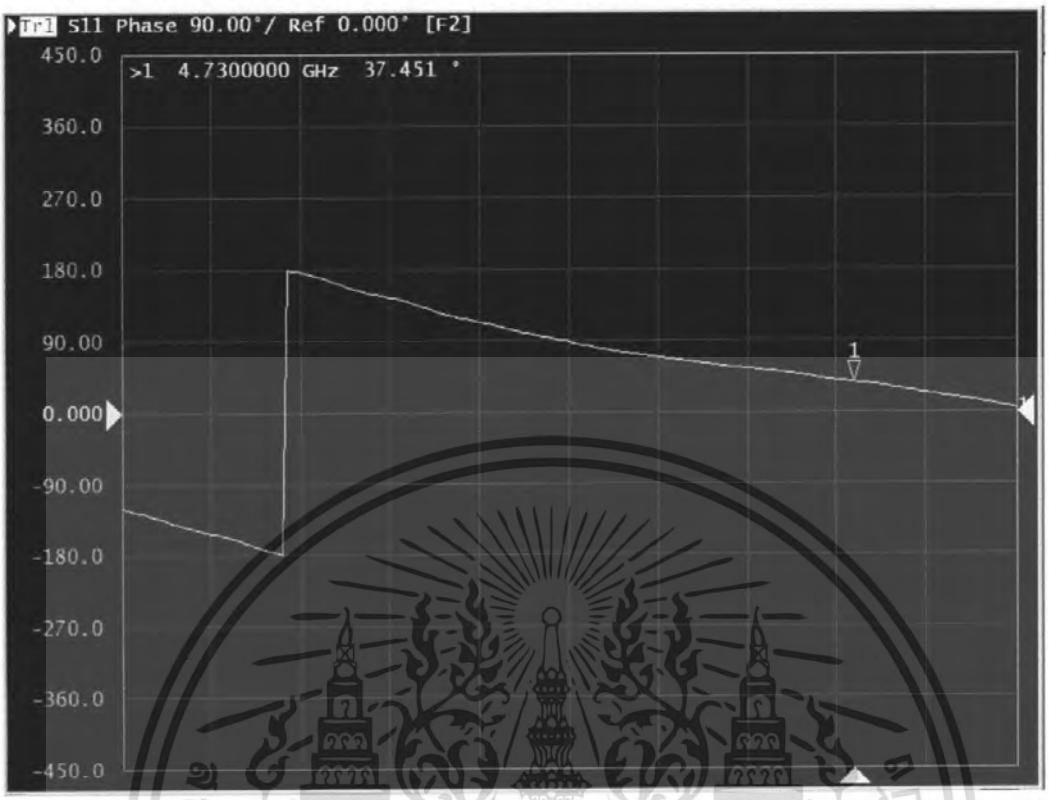


รูปที่ 4.11 (ณ) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 4 ได้ -29.906 dB

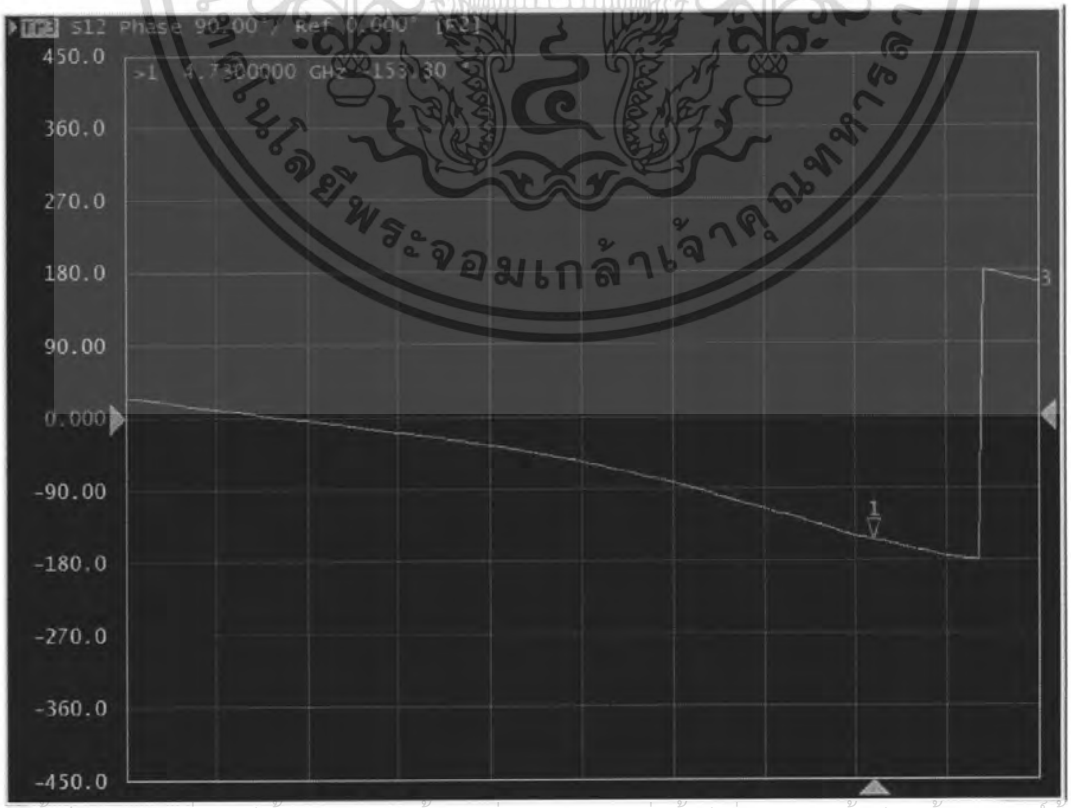


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.11 (ด) แสดงอัตราส่งผ่านของไฮบริดริงที่พอร์ต 4 ไปยังพอร์ต 4 ได้ -14.959 dB

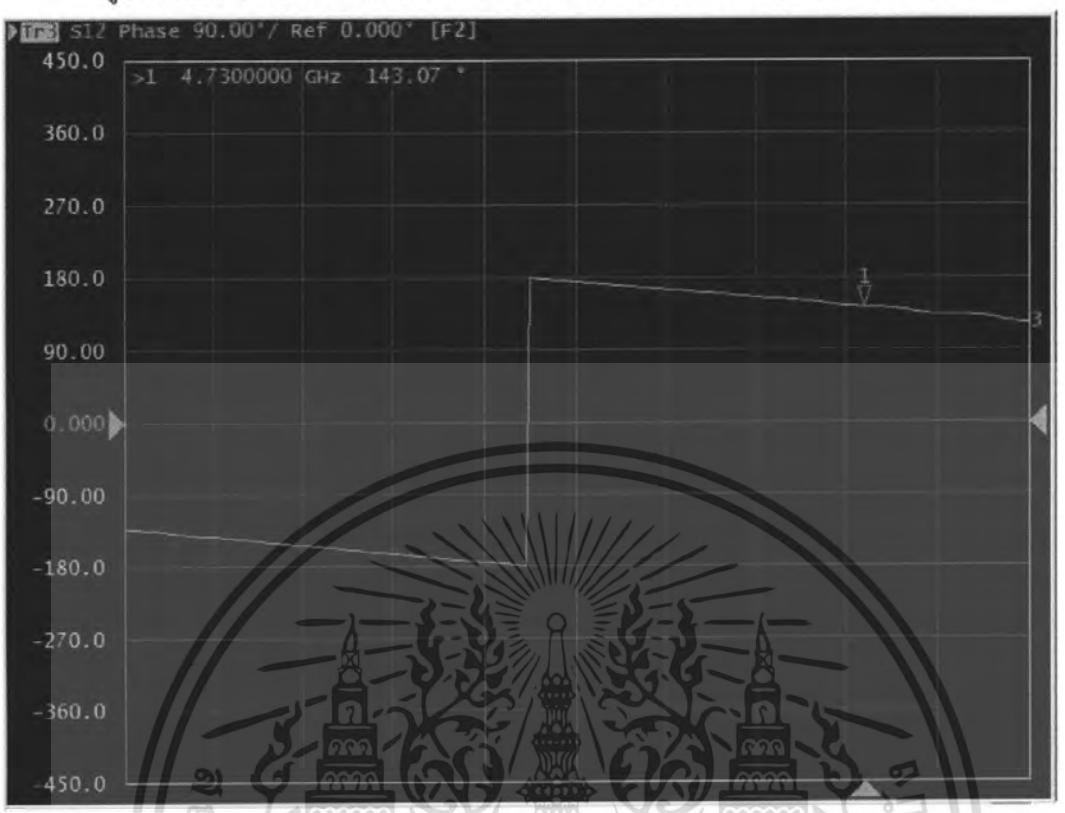


รูปที่ 4.12 (ก) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 1 ได้ 37.451 องศา

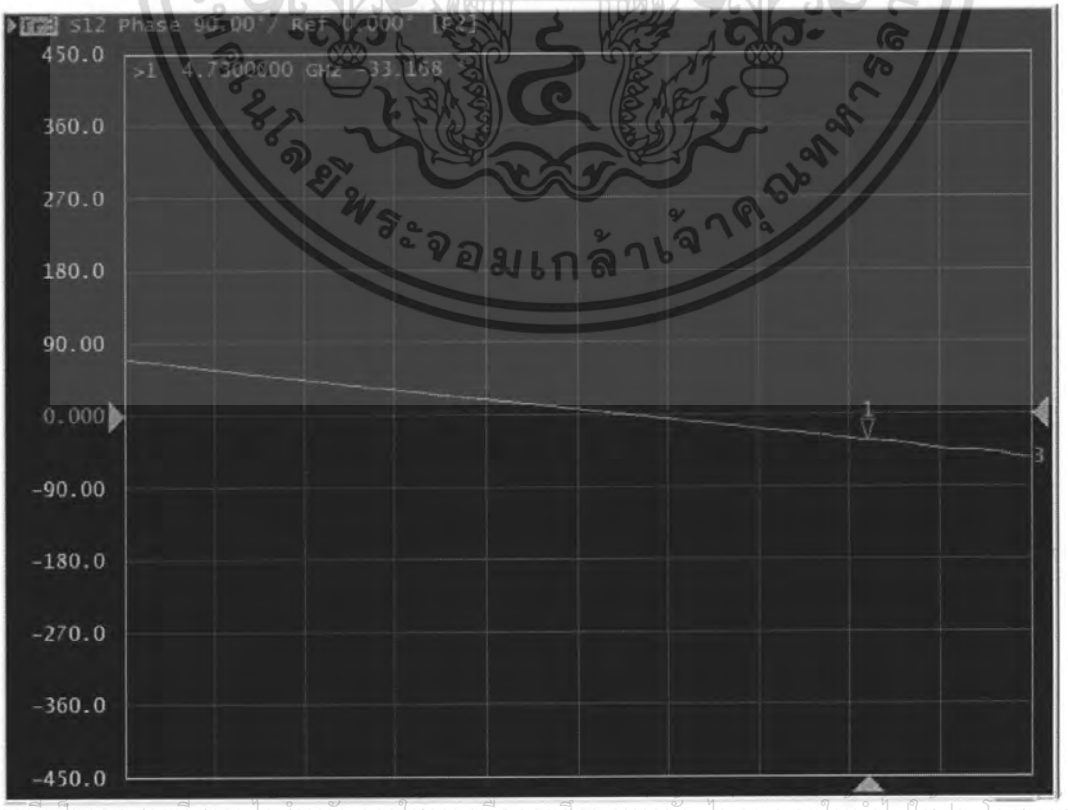


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.12 (ข) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 2ไปยังพอร์ต 1 ได้ -153.30 องศา

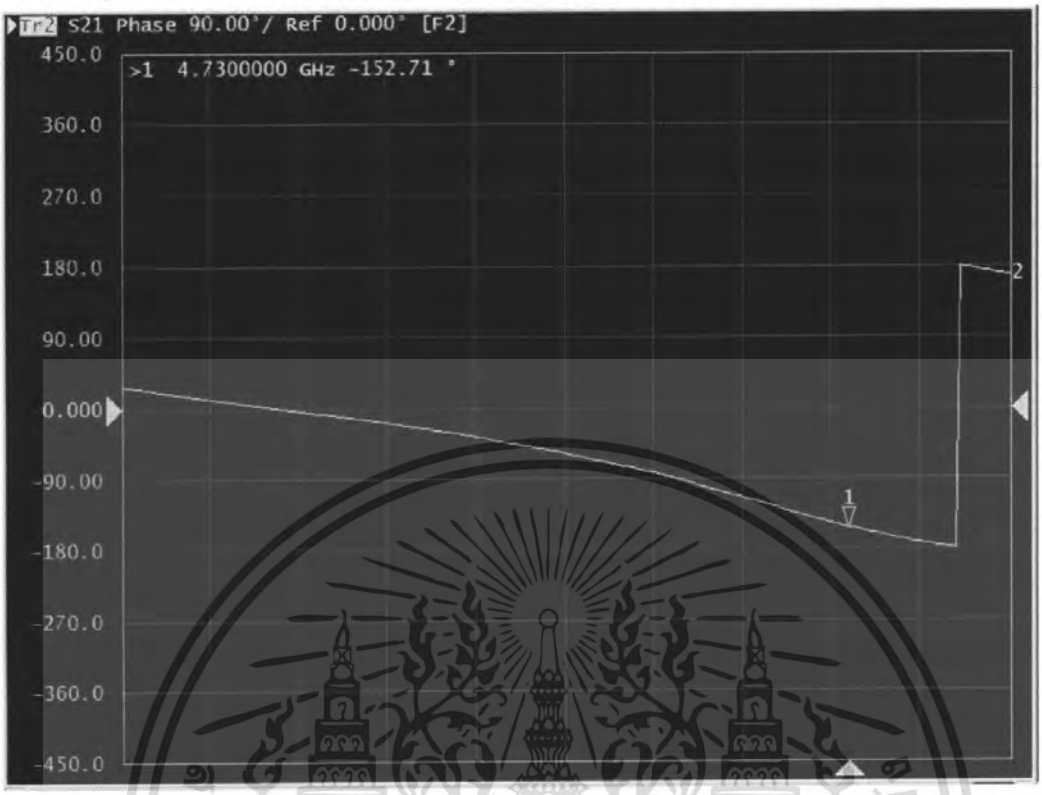


รูปที่ 4.12 (ค) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 3ไปยังพอร์ต 1 ได้ 143.07 องศา

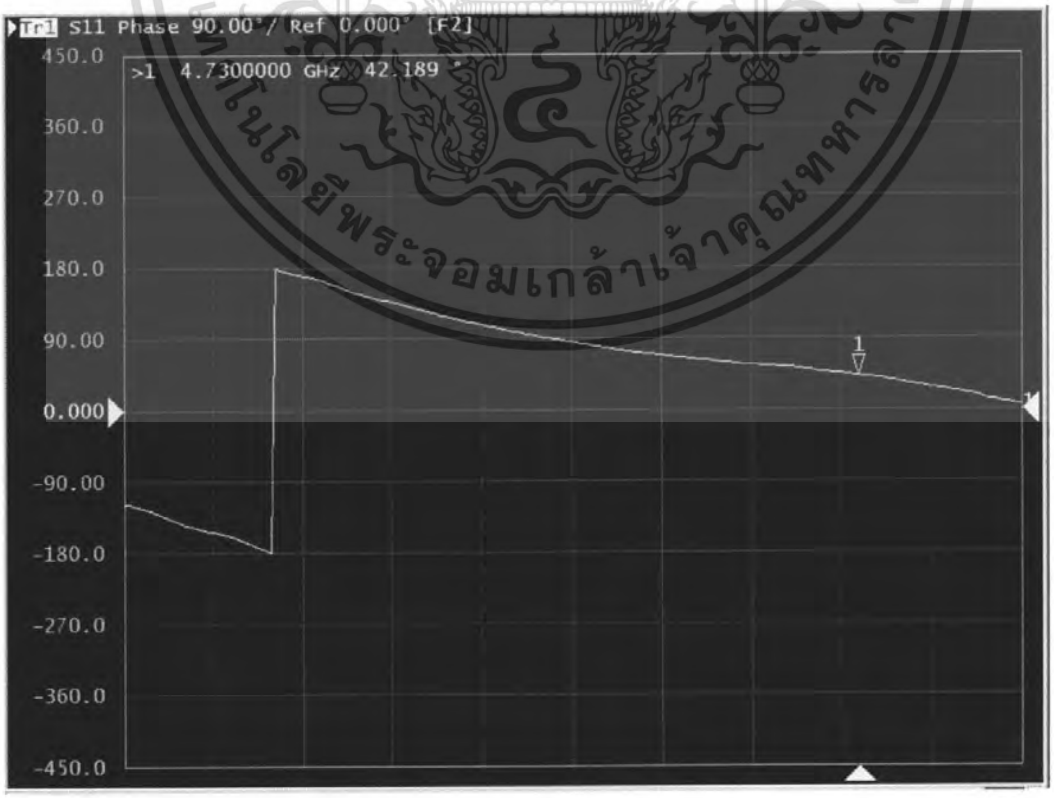


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.12 (ง) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 4ไปยังพอร์ต 1 ได้ -33.168 องศา

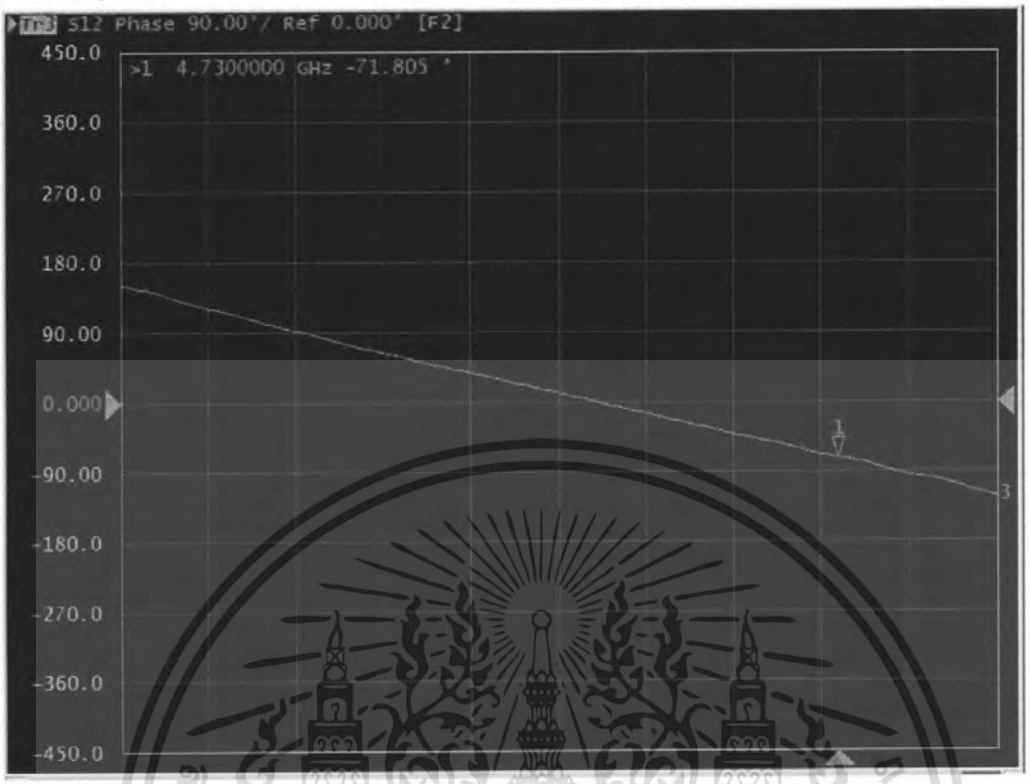


รูปที่ 4.12 (จ) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 1ไปยังพอร์ต 2 ได้ -152.71 องศา

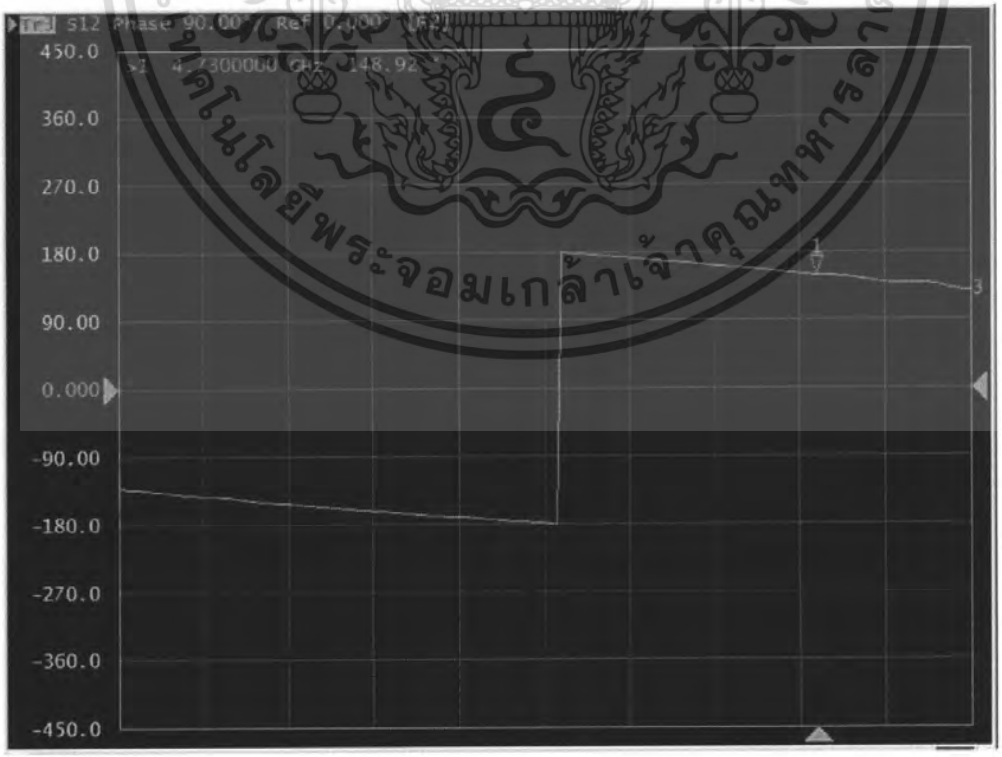


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.12 (ฉ) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 2ไปยังพอร์ต 2 ได้ 42.189 องศา

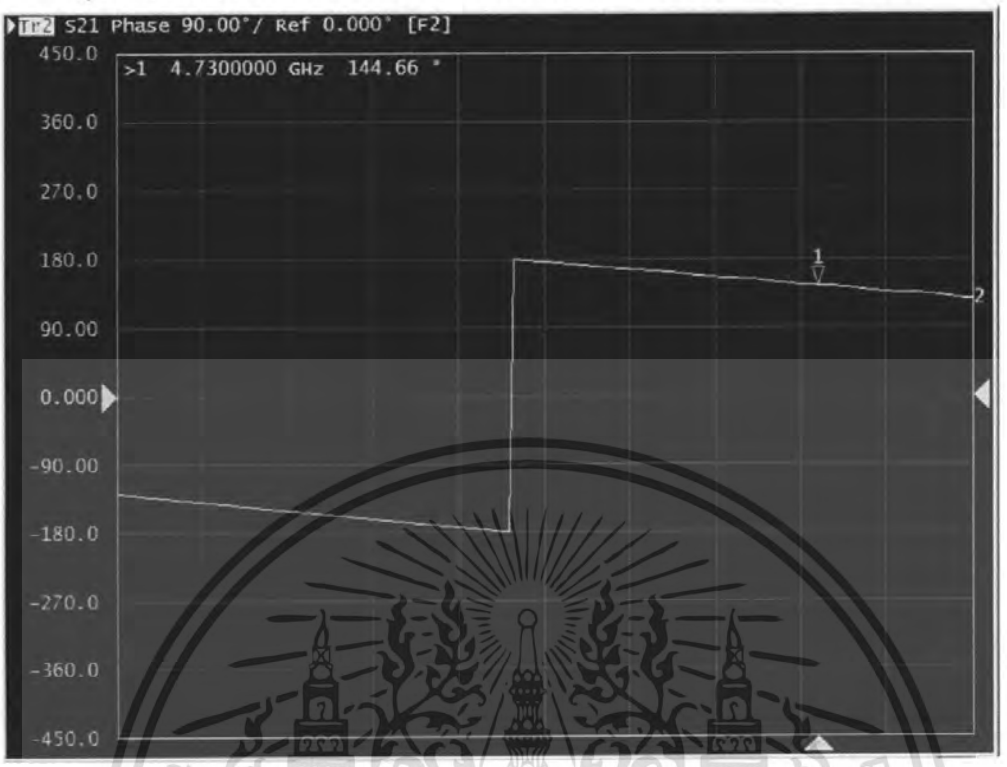


รูปที่ 4.12 (ช) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 3 ได้ -71.805 องศา

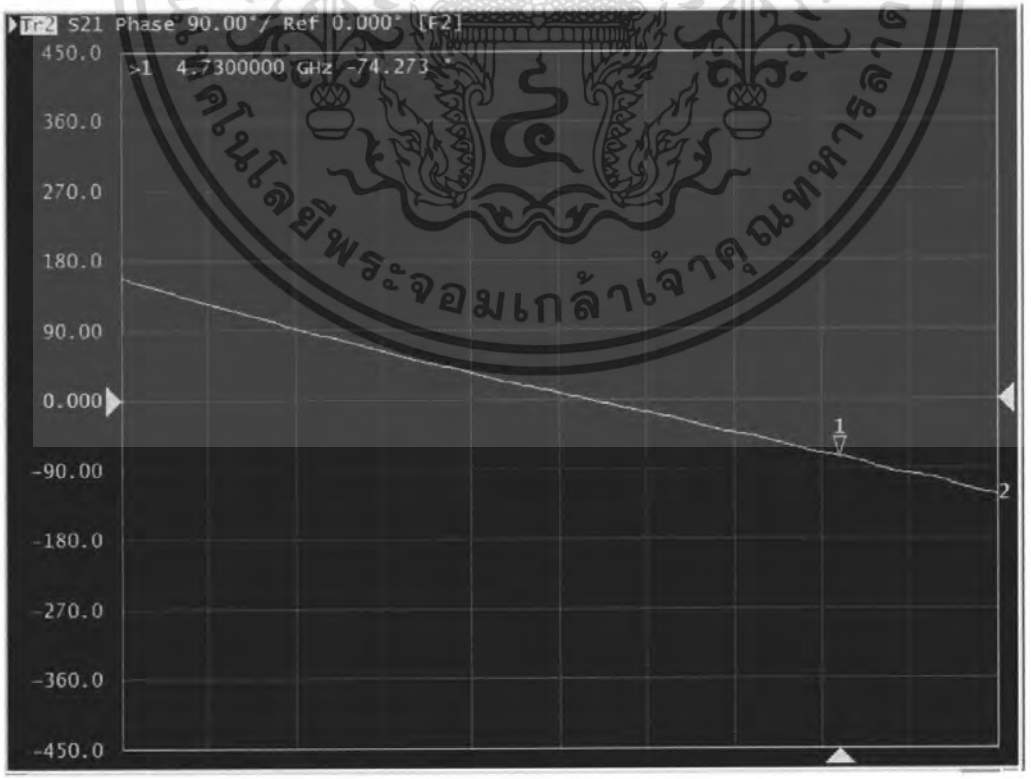


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.12 (ซ) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 4 ไปยังพอร์ต 2 ได้ 148.92 องศา

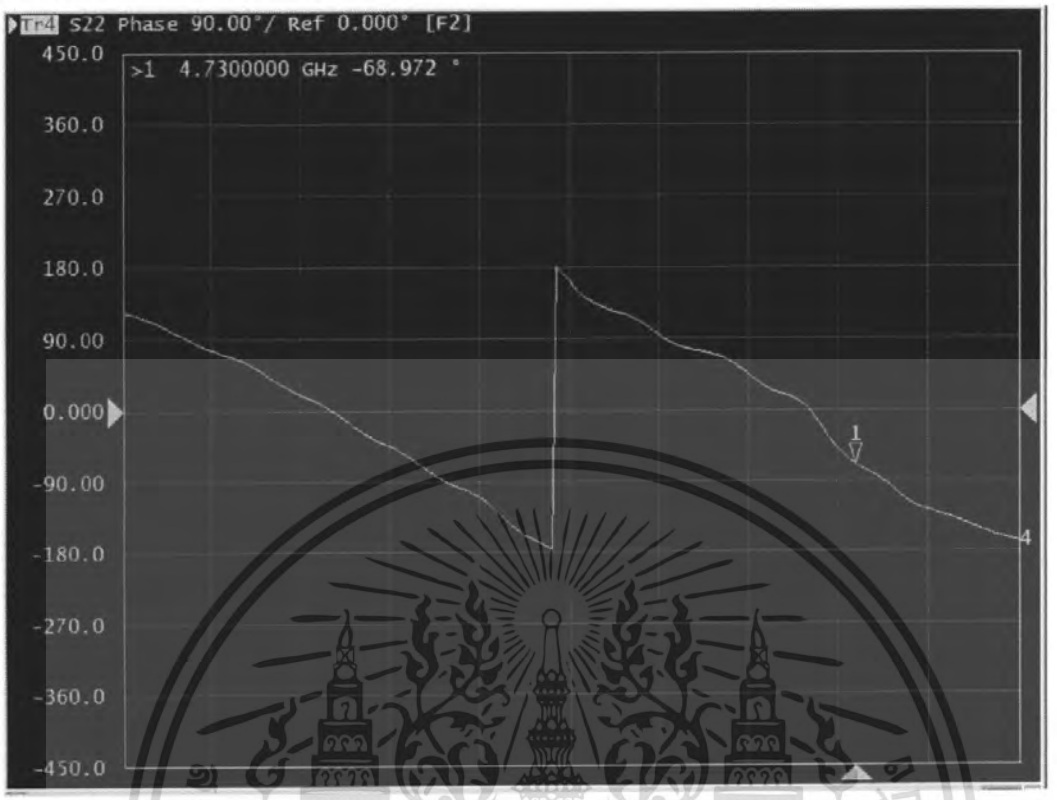


รูปที่ 4.12 (ญ) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 1 ไปยังพอร์ต 3 ได้ 144.66 องศา

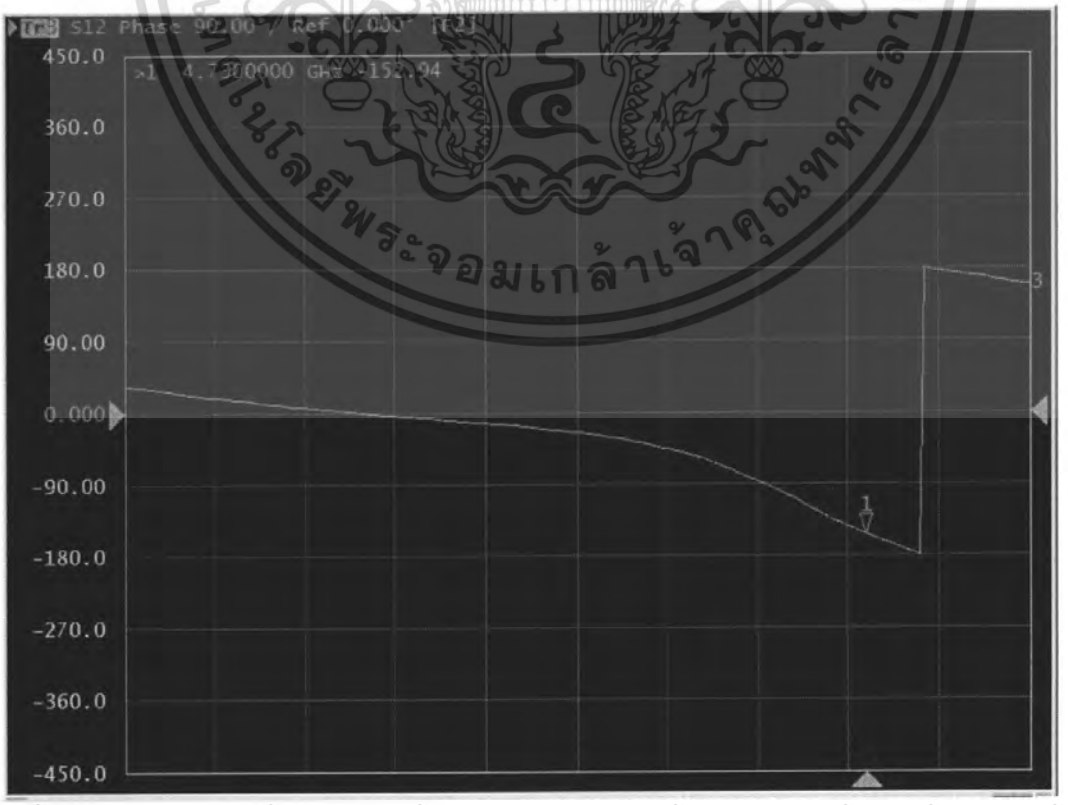


รูปที่ 4.12 (ฎ) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 2 ไปยังพอร์ต 3 ได้ -74.273 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

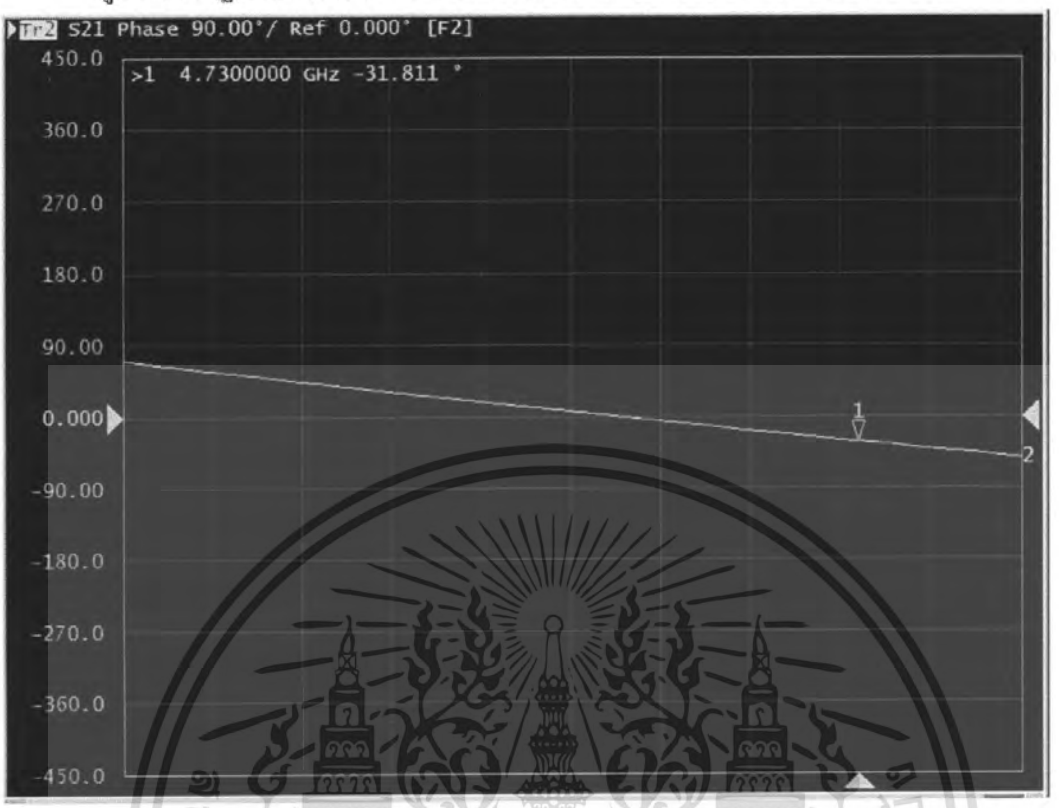


รูปที่ 4.12 (ฎ) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 3 ไปยังพอร์ต 3 ได้ -68.972 องศา

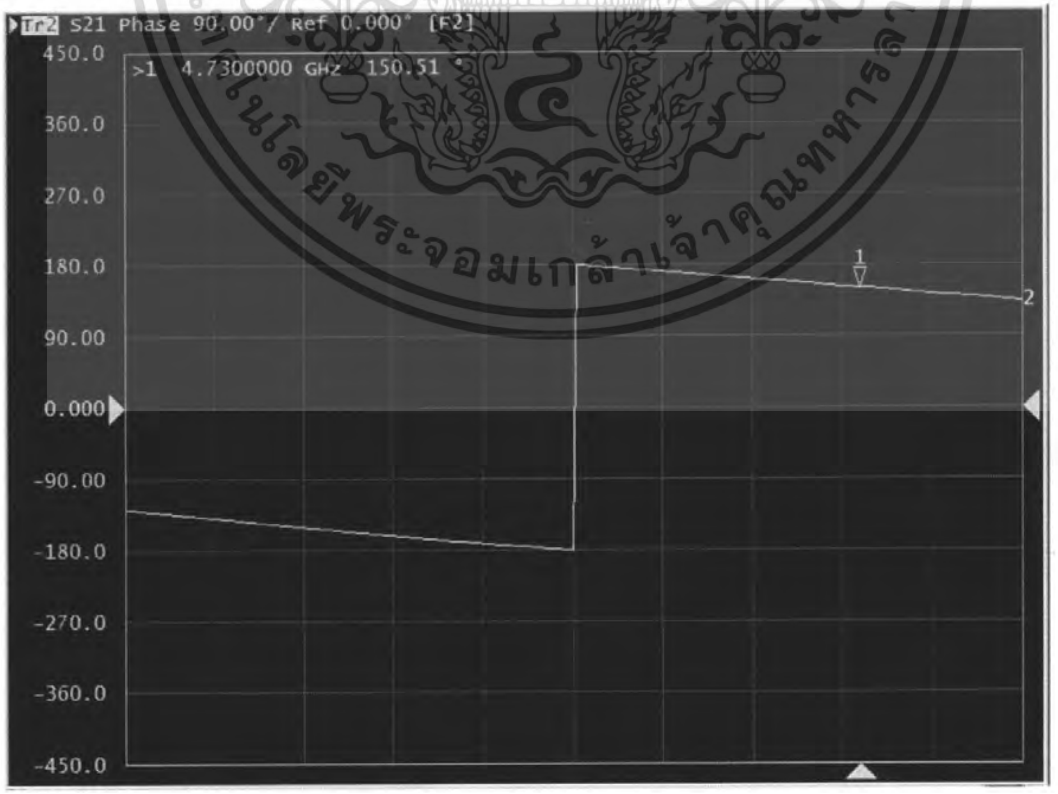


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.12 (ฐ) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 4ไปยังพอร์ต 3 ได้ -152.94 องศา

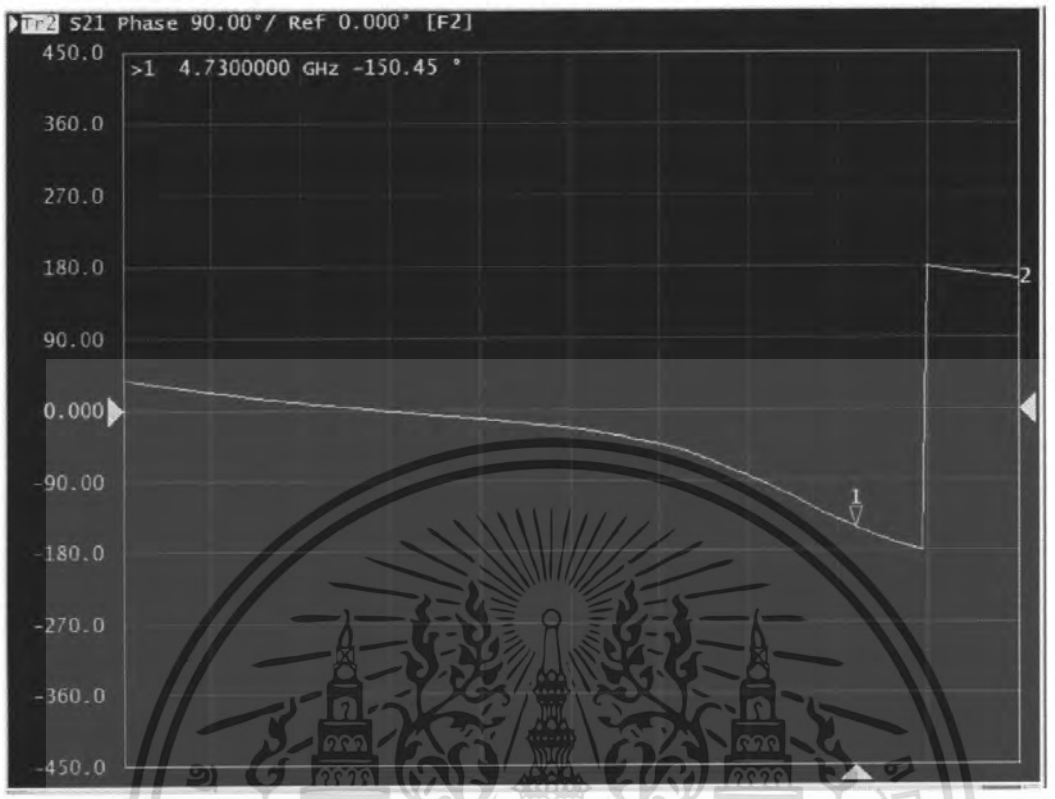


รูปที่ 4.12 (ฑ) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 1ไปยังพอร์ต 4 ได้ -31.811 องศา

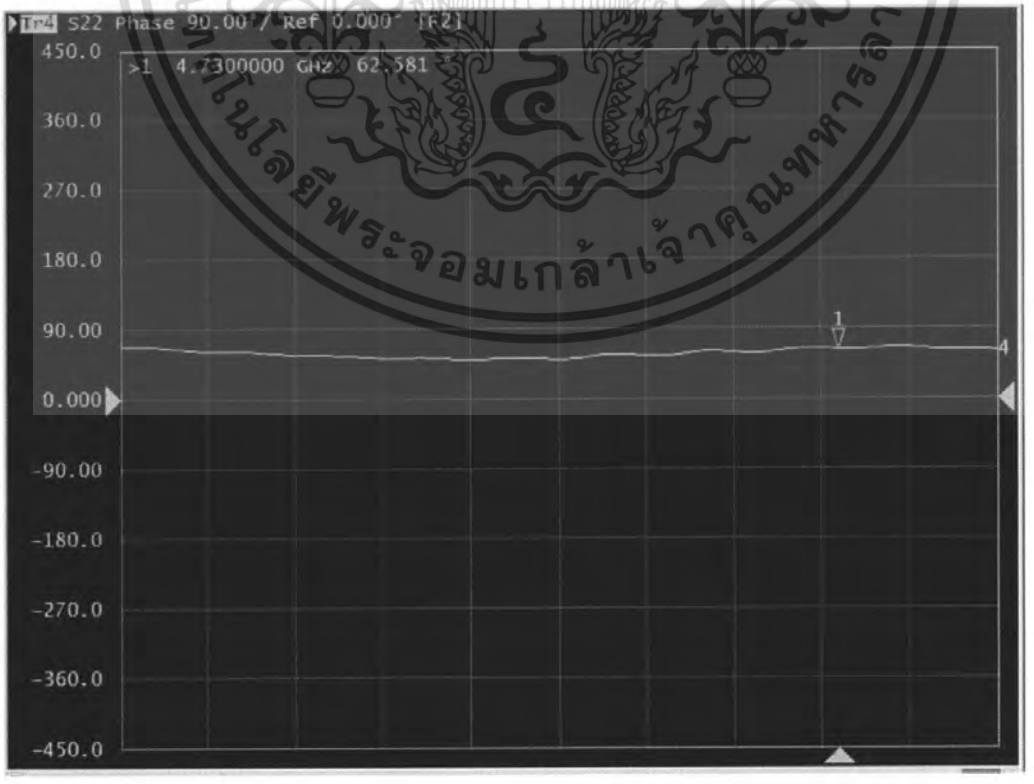


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.12 (ฒ) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 2ไปยังพอร์ต 4 ได้ 150.51 องศา



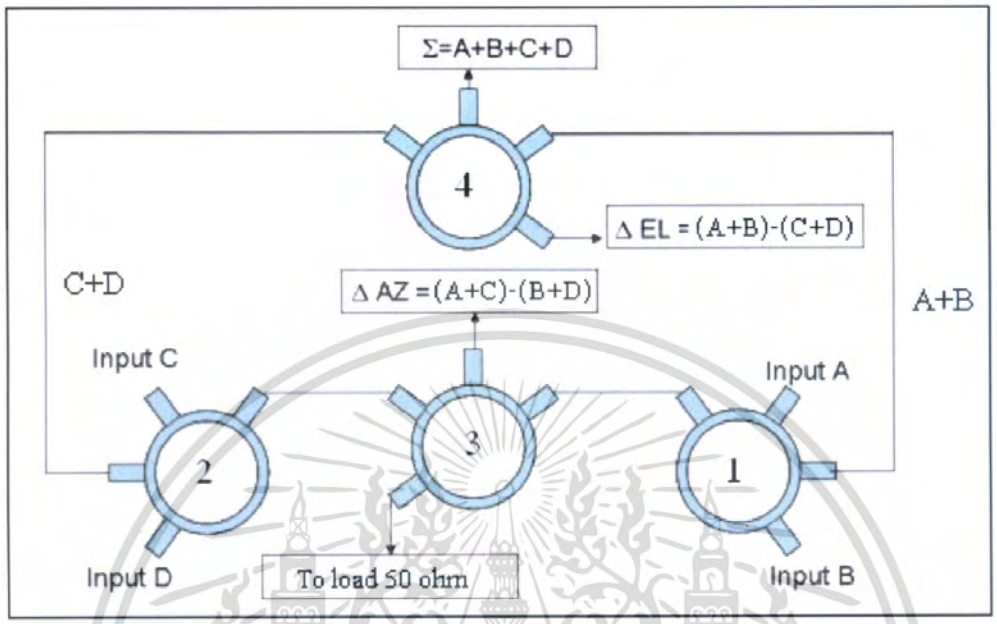
รูปที่ 4.12 (ณ) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 3ไปยังพอร์ต 4 ได้ -150.45 องศา



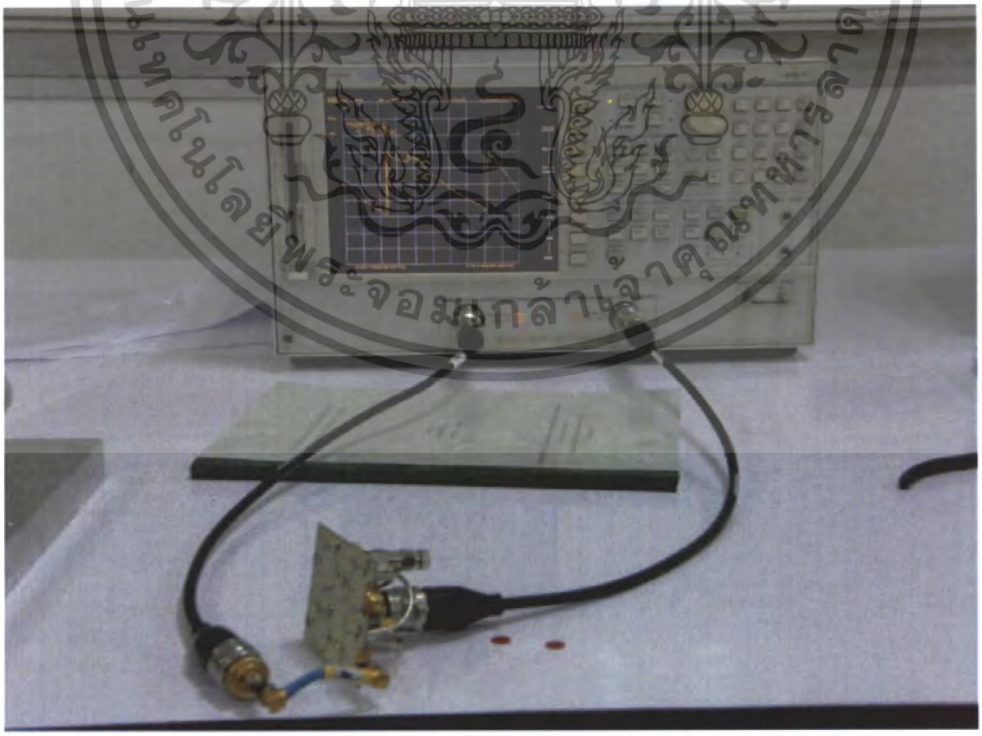
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.12 (ค) แสดงเฟสของไฮบริดริงที่พอร์ต 4ไปยังพอร์ต 4 ได้ 62.581 องศา

4.3.2 การทดสอบเฟสของ Monopulse Comparator



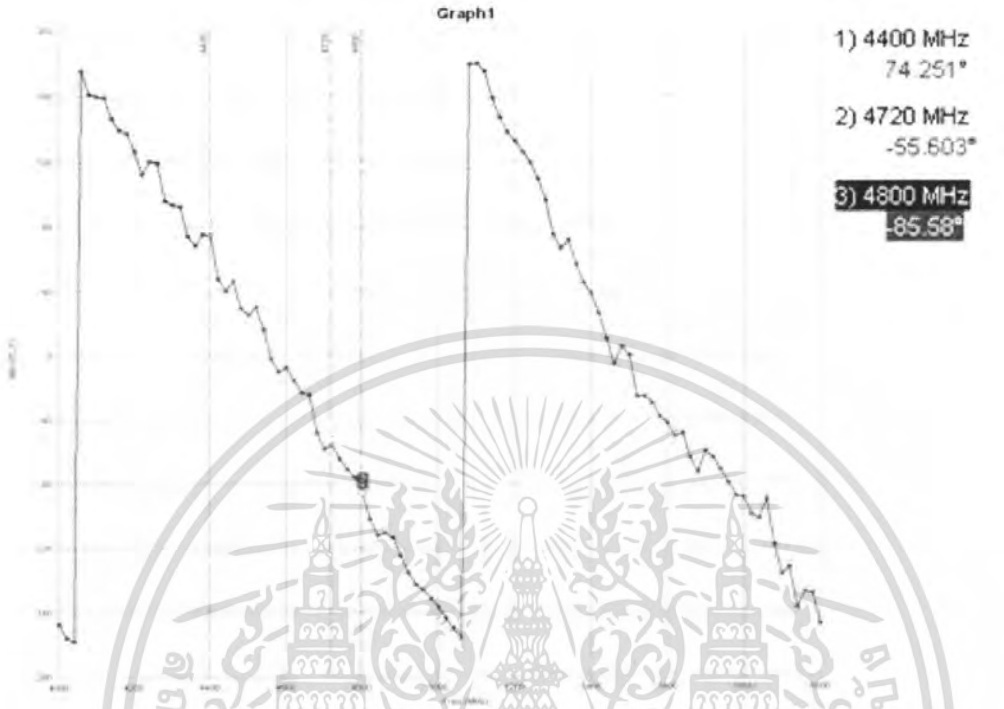
รูปที่ 4.13(ก) แสดงวงจรการนำไฮบริดริงมาต่อเป็น Monopulse Comparator



รูปที่ 4.13 (ข) การทดลองเมื่อนำไฮบริดริงมาต่อเป็น Monopulse Comparator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

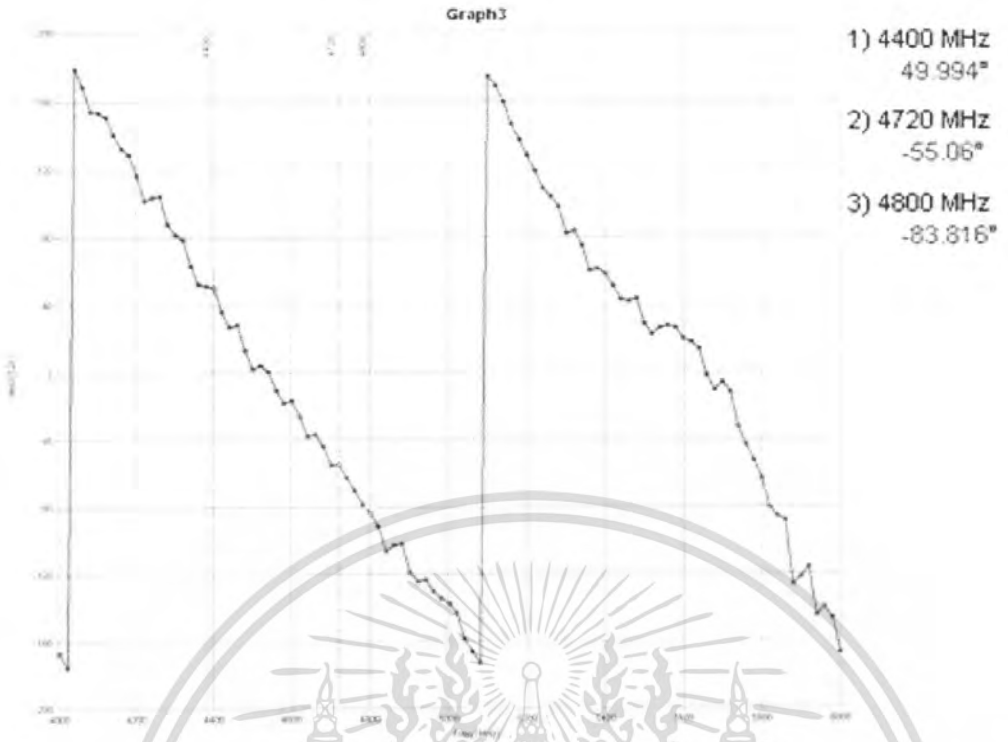
และเมื่อทำการต่อวงจรตามรูปที่ 4.13 และทำการทดลองได้ค่าเฟสของพอร์ตต่างๆต่อไปนี้



รูปที่ 4.14 (ก) กราฟแสดงเฟส ระหว่างพอร์ต Sum และพอร์ต A มีความต่างเฟส -55.603 องศา

รูปที่ 4.14 (ข) กราฟแสดงเฟส ระหว่างพอร์ต Sum และพอร์ต B มีความต่างเฟส -55.059 องศา

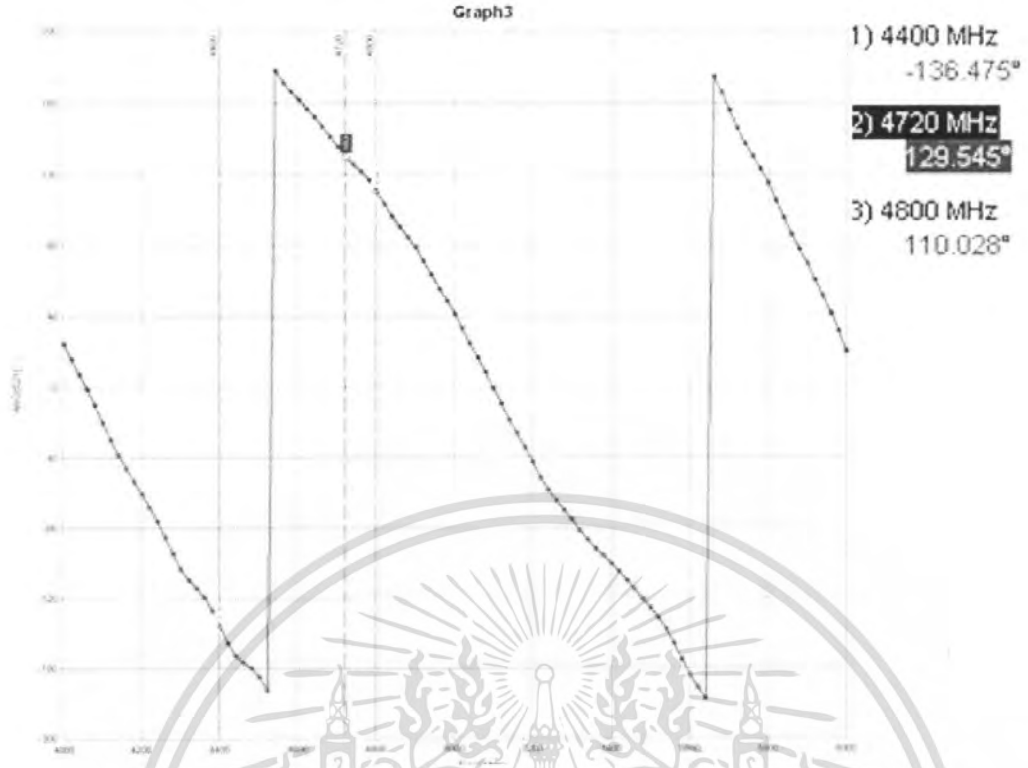
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



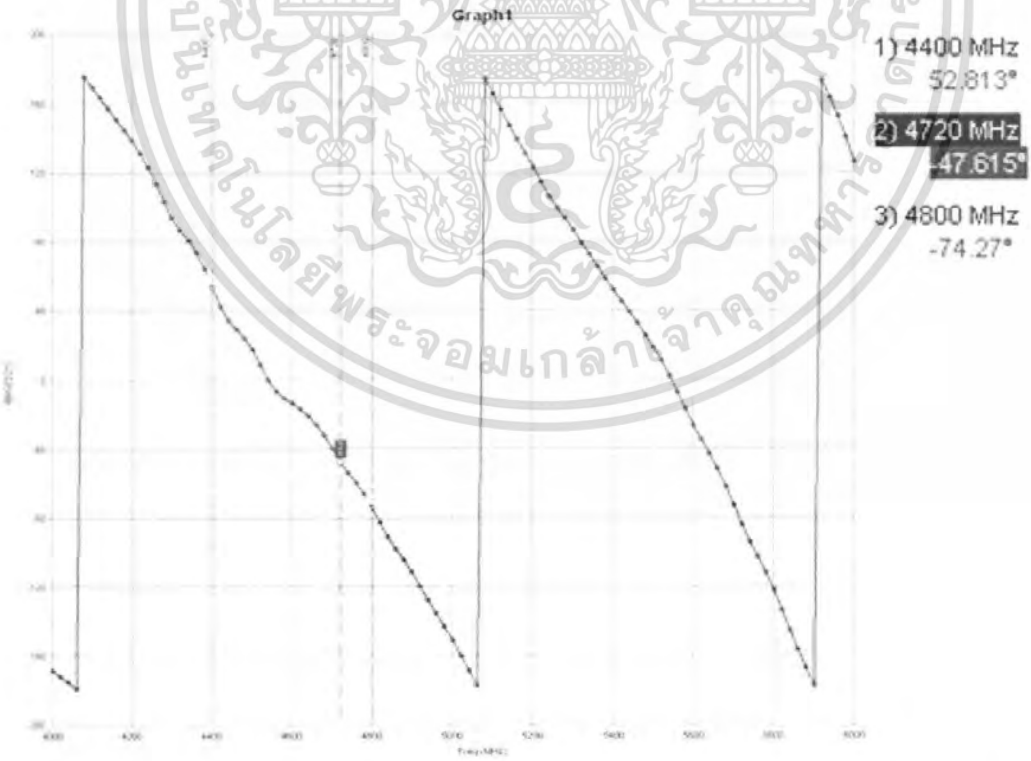
รูปที่ 4.14 (ง) กราฟแสดงเฟส ระหว่างพอร์ต Sum และพอร์ต C มีความต่างเฟส -55.06 องศา

รูปที่ 4.14 (จ) กราฟแสดงเฟส ระหว่างพอร์ต Sum และพอร์ต D มีความต่างเฟส -58.564 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

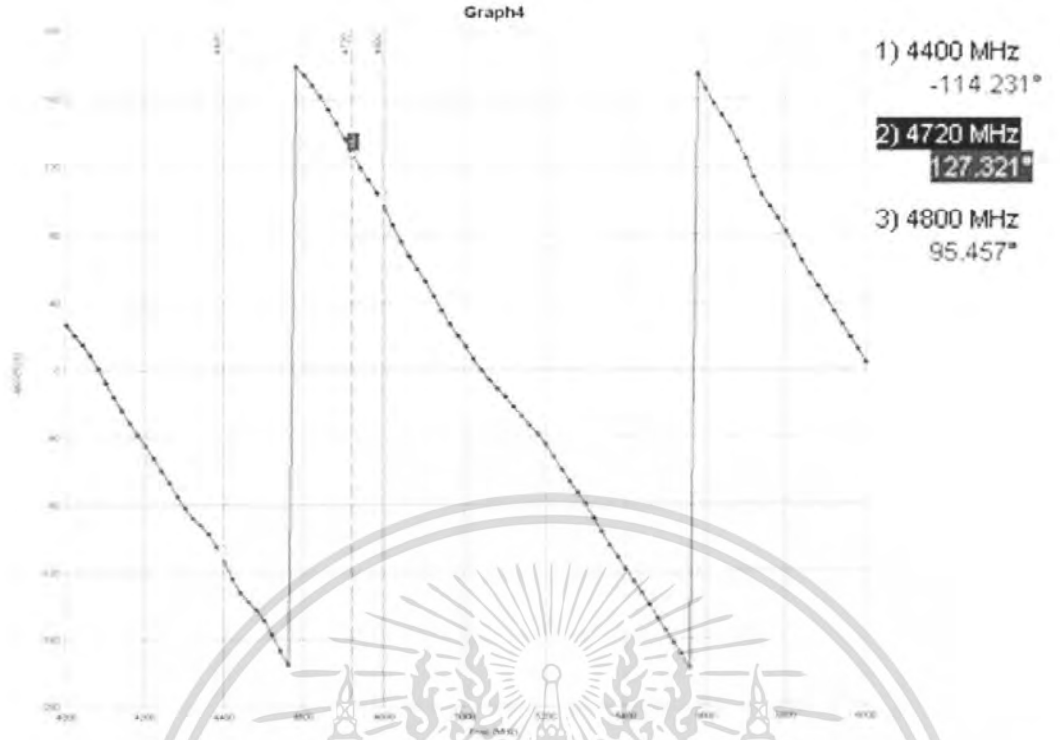


รูปที่ 4.14 (ฉ) กราฟแสดงเฟส ระหว่างพอร์ต ΔAZ และพอร์ต A มีความต่างเฟส 129.545 องศา

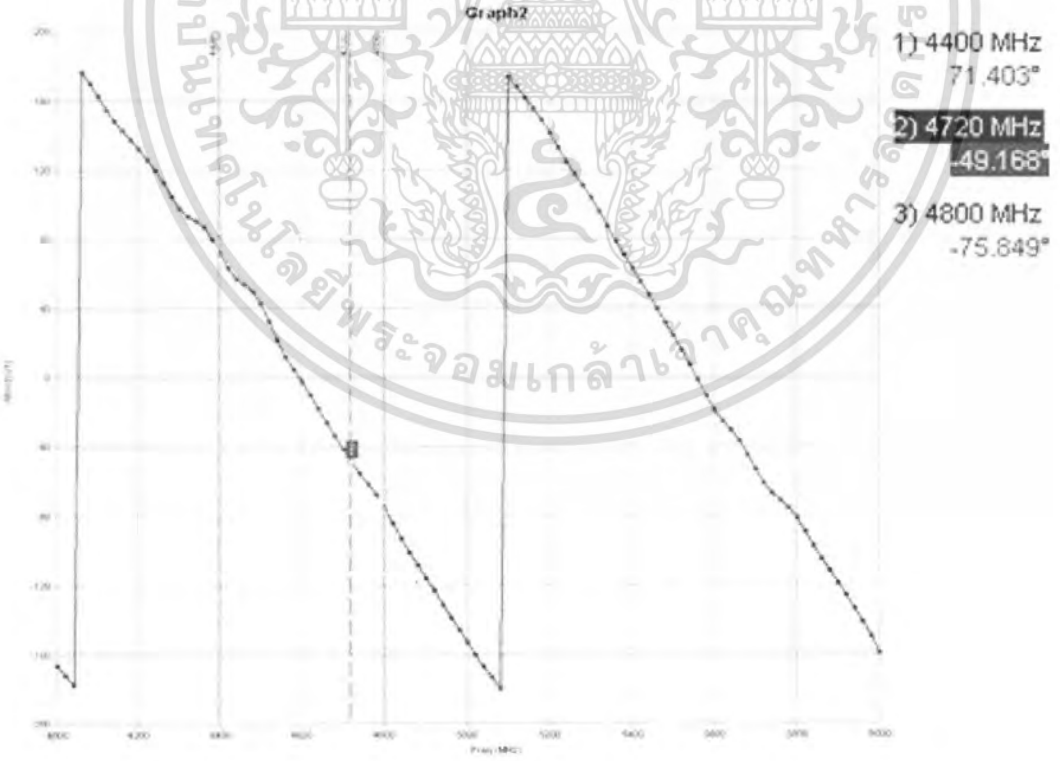


รูปที่ 4.14 (ช) กราฟแสดงเฟส ระหว่างพอร์ต ΔAZ และพอร์ต B มีความต่างเฟส -47.615 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

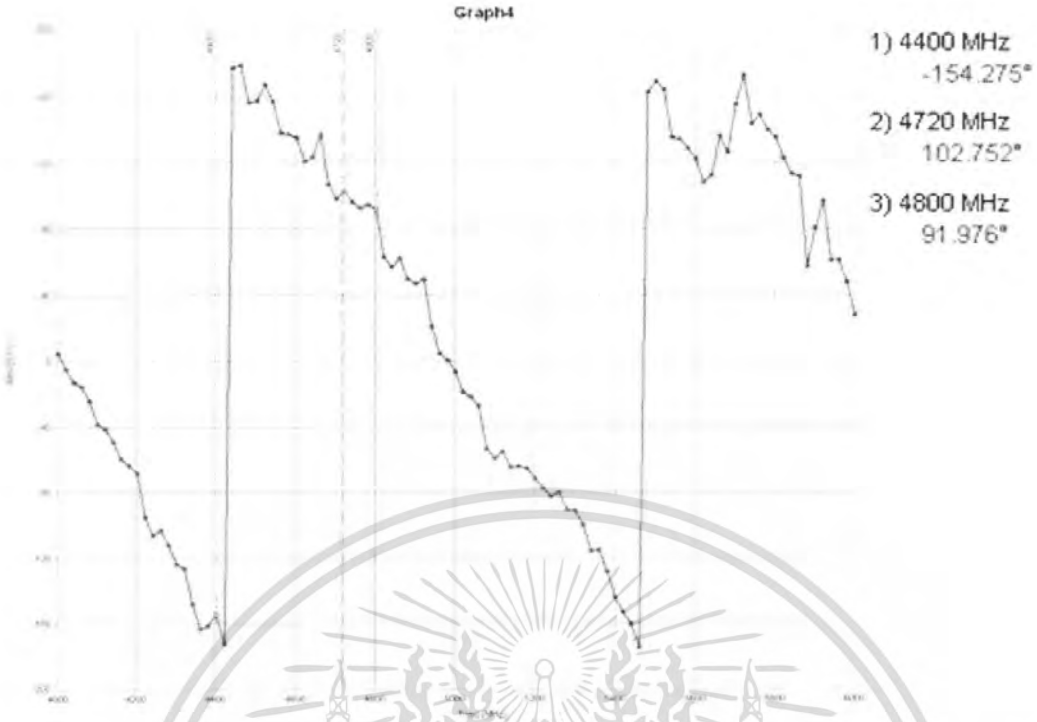


รูปที่ 4.14 (ซ) กราฟแสดงเฟส ระหว่างพอร์ต ΔAZ และพอร์ต C มีความต่างเฟส 127.321 องศา

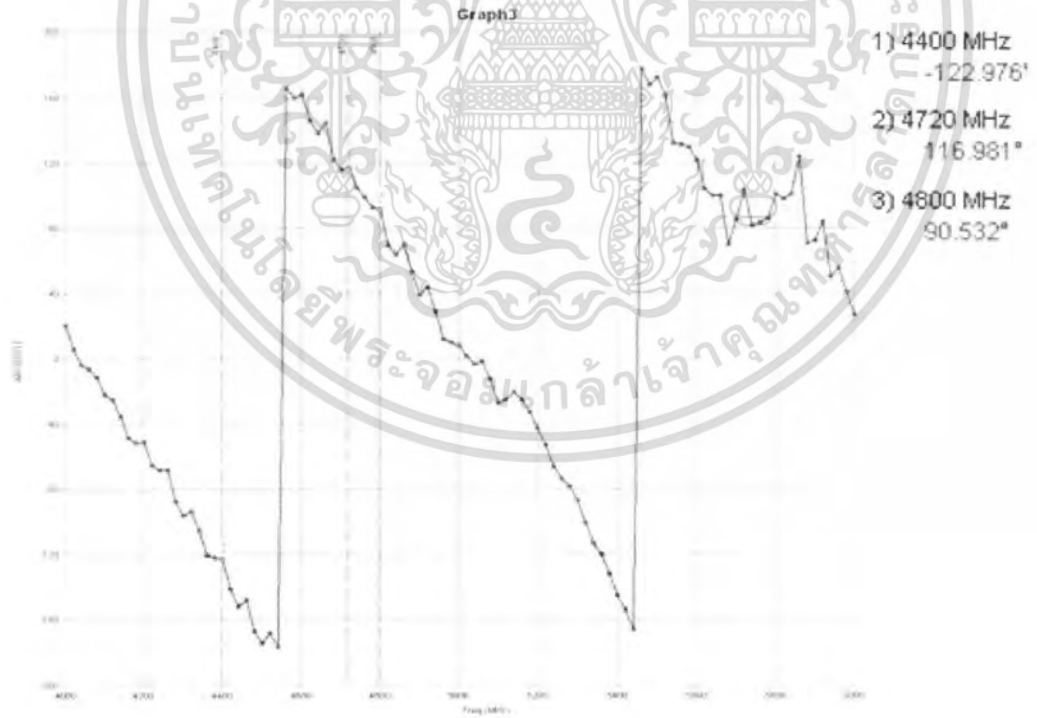


รูปที่ 4.14 (ญ) กราฟแสดงเฟส ระหว่างพอร์ต ΔAZ และพอร์ต D มีความต่างเฟส -49.168 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

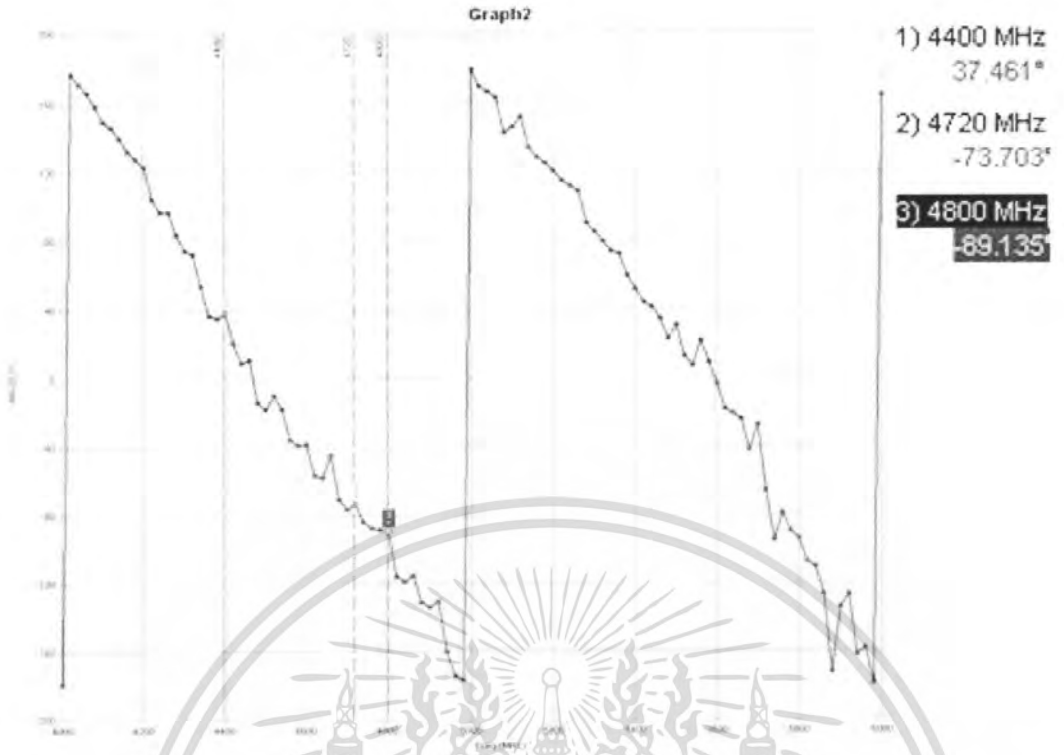


รูปที่ 4.14 (ฎ) กราฟแสดงเฟส ระหว่างพอร์ต ΔELและพอร์ต A มีความต่างเฟส -102..752 องศา

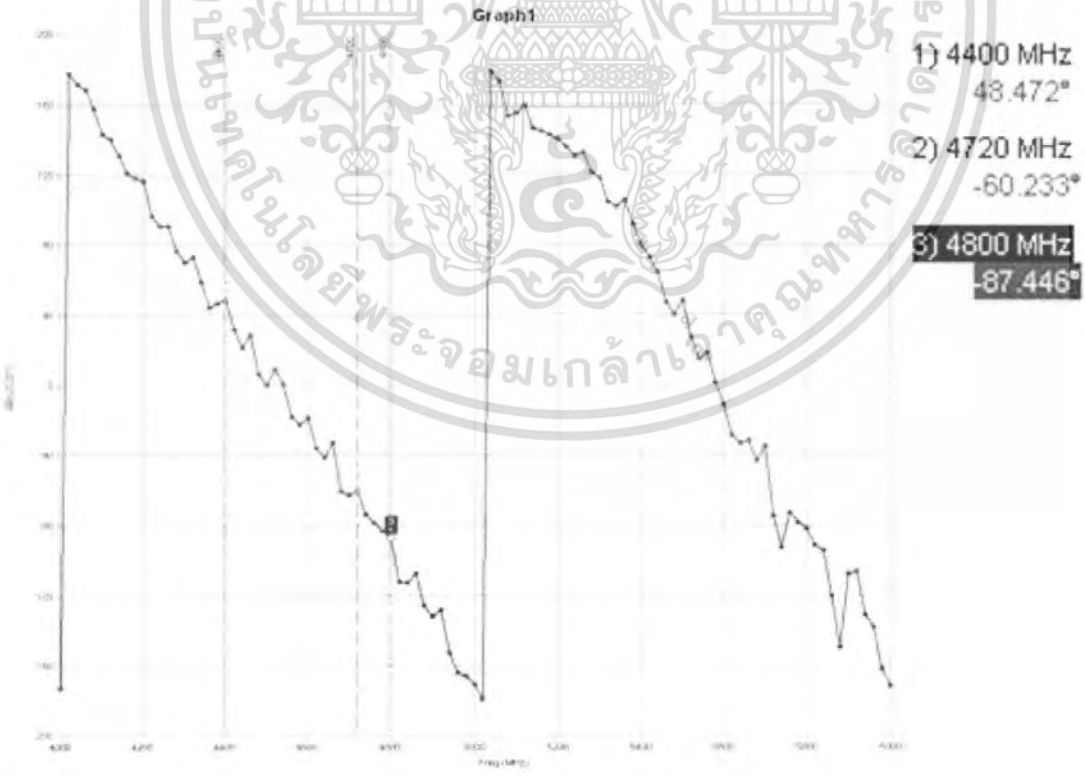


รูปที่ 4.14 (ฎ) กราฟแสดงเฟส ระหว่างพอร์ต ΔEL และพอร์ต B มีความต่างเฟส -116.981 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 (ฐ) กราฟแสดงเฟส ระหว่างพอร์ต ΔEL และพอร์ต C มีความต่างเฟส -73..703 องศา



รูปที่ 4.14 (ฑ) กราฟแสดงเฟส ระหว่างพอร์ต ΔEL และพอร์ต D มีความต่างเฟส -60.233 องศา

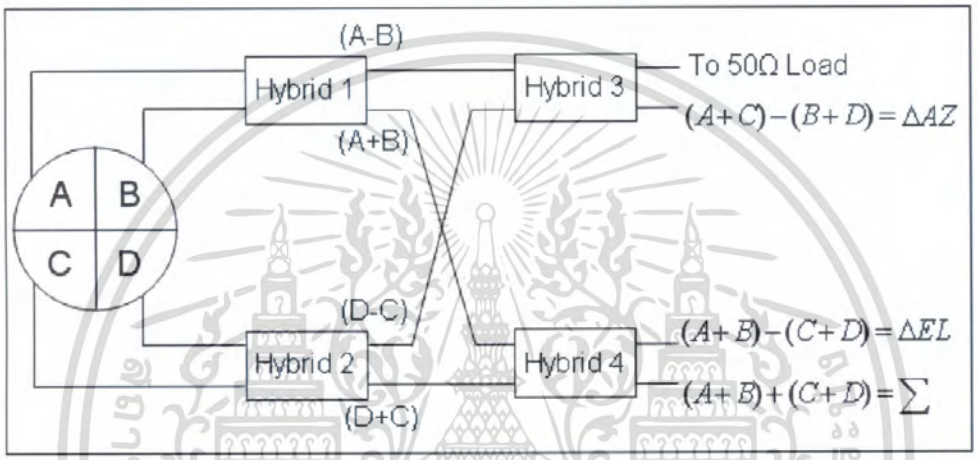
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 สรุปผลการทดลองไฮบริดริง

ผลที่ได้จากการทดสอบนั้นได้ค่าสัมประสิทธิ์ต่างๆค่อนข้างใกล้เคียงกับทฤษฎี และใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม CST

4.4 การทดลอง Monopulse Tracking Antenna

โดยการนำสายอากาศเฮลิคอล ทั้ง 4 ตัว มาต่อเข้ากับ พอร์ต A B C และ D ของ Monopulse Comparator ตามรูปต่อไปนี้



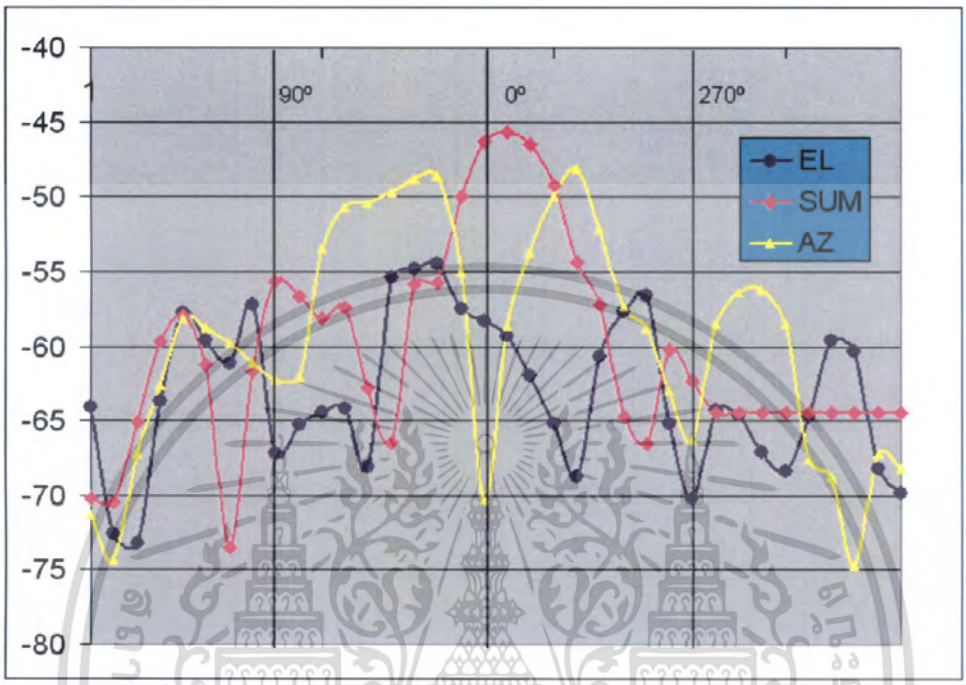
รูปที่ 4.15 การต่อสายอากาศเฮลิคอลเข้ากับ Monopulse Comparator

รูปที่ 4.16 แสดงการทดลอง Monopulse Tracking Antenna

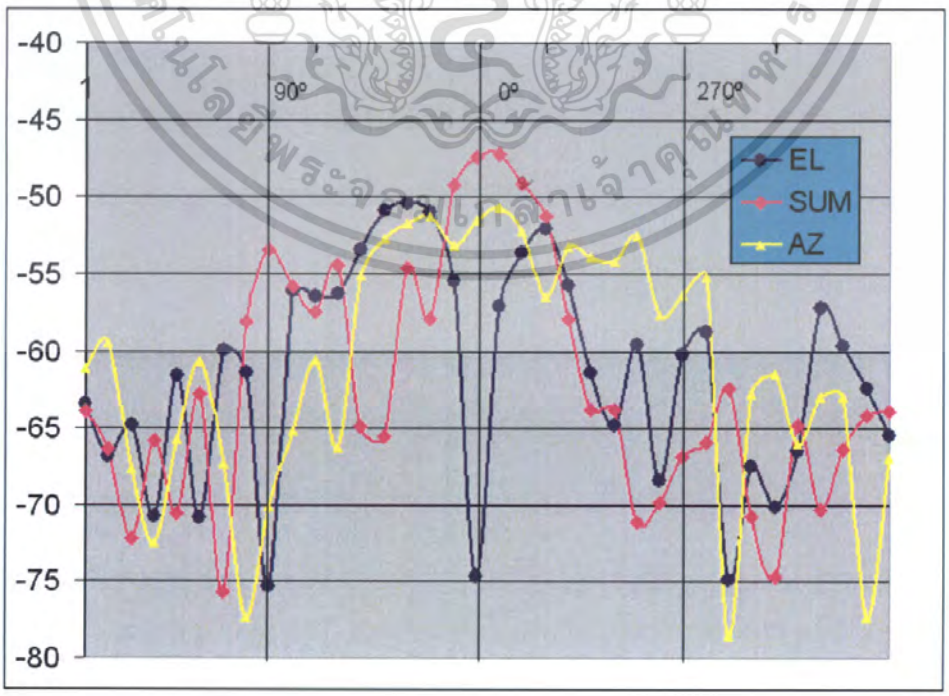
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1 การทดลองวัด Pattern ของ Monopulse Tracking Antenna

การทดลอง Monopulse Tracking Antenna นั้นจะทำการทดลอง ใน 2 ระนาบ คือในระนาบของมุมเงยและระนาบของมุมกวาด ค่าที่ได้จากการทดลองเป็นดังกราฟต่อไปนี้



รูปที่ 4.17 (ก) กราฟที่ได้จากการทดลองวัด Pattern ในมุมกวาด



รูปที่ 4.17 (ข) กราฟที่ได้จากการทดลองวัด Pattern ในมุมเงย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 สรุปผลการทดลอง Monopulse Tracking Antenna

ผลการทดลองของ Monopulse Tracking Antenna ที่ทดลองได้นั้น สังเกตจากกราฟที่ได้ทั้งสองกราฟ ที่มุม 0 องศา นั้นพอร์ต $\sum$ (SUM) มีค่าสูงสุดทั้งสองกราฟและจะค่อยลดลง เพราะว่าเป็นผลรวมของสัญญาณที่รับมาจากสายอากาศทั้ง 4 ทั้ง ส่วนในด้านของพอร์ต Δ_{EL} นั้นเป็นผลต่างของมุมเงย (A+B)-(C+D) ซึ่งถ้าดูจากกราฟของมุมเงยที่มุม 0 องศาค่าของ Δ_{EL} จะมีค่าน้อยที่สุดและจะค่อยๆเพิ่มขึ้น และในด้านของพอร์ต Δ_{AZ} จะเป็นผลต่างของมุมกวาด (A+C)-(B+D) จึงทำให้กราฟที่ได้จากการทดลองในมุมกวาด ที่มุม 0 องศา Δ_{AZ} มีค่าน้อยที่สุดและจะค่อยๆเพิ่มขึ้นมุม ในส่วนนี้จึงเป็นไปตามทฤษฎี ที่ระบุไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
บทสรุป และบทวิจารณ์

ในการสื่อสารโดยทั่วไป การที่จะรับสัญญาณได้อย่างเต็มที่นั้นจะต้องทำการหันสายอากาศรับให้ตรงกับตำแหน่ง และทิศทางของสัญญาณที่ส่งมา แต่สำหรับกรณีของการสื่อสารในกรณีที่สายอากาศส่งมีการเคลื่อนที่ตลอดเวลา จะต้องใช้ระบบติดตามในการรับสัญญาณแบบอัตโนมัติมาช่วยในการติดตามสัญญาณเพื่อทำให้การรับสัญญาณนั้นรับได้ดีที่สุด

ซึ่งปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษา ออกแบบ และสร้างระบบติดตามเป้าหมายอัตโนมัติแบบโมโนพัลส์แบบเปรียบเทียบด้วยเฟส ในส่วนของภาครับสัญญาณ และวิเคราะห์สัญญาณ

โดยในส่วนของภาครับสัญญาณนั้นได้ออกแบบการจัดวางสายอากาศเฮลิคอลโหมดแนวแกนจำนวน 4 ตัว ในลักษณะสี่เหลี่ยมจัตุรัส เพื่อจะได้นำสัญญาณที่ได้จากสายอากาศทั้ง 4 ตัวมาเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณ

โดยในส่วนของภาควิเคราะห์สัญญาณ ได้ออกแบบวงจรตรวจจับสัญญาณโดยใช้ไมโครสตริป เป็นไฮบริดริงจังชั่น ทำการเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณ เพื่อใช้ในการหาทิศทางของเป้าหมายว่าอยู่ทางซ้ายหรือขวา บนหรือล่าง

เมื่อได้รับสัญญาณที่วิเคราะห์ว่าเป้าหมายอยู่ทางซ้ายหรือขวา บนหรือล่างและอยู่ในตำแหน่งมุมเท่าใดนั้นก็จะสามารถส่งไปให้ในส่วนของภาคควบคุมสายอากาศ เปลี่ยนให้เป็นสัญญาณทางลอจิกแล้วส่งไปให้ไมโครโปรเซสเซอร์เพื่อไปควบคุมมอเตอร์ให้หมุนสายอากาศกลับมาตรงตำแหน่งที่สามารถรับสัญญาณได้ดีที่สุด

5.1 สรุปผลการทดสอบ

การทดลองที่ผ่านมานั้นได้ทำการทดลองในส่วนของภาครับสัญญาณและเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณ โดยโครงงานชิ้นนี้ใช้สายอากาศเฮลิคอลในโหมดแนวแกนเป็นตัวรับสัญญาณ และใช้ไฮบริดริงจังชั่นเป็นตัวเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณ ผลการทดลองโดยรวมนั้นเป็นไปตามเป้าหมายที่วางไว้ และตรงตามทฤษฎี และการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม CST โดยพอร์ต $\sum$(Sum) สามารถที่จะรวมสัญญาณจากสายอากาศทั้ง 4 ได้ พอร์ต Δ_{AZ} สามารถที่จะหาผลต่างของสัญญาณในมุมกวาดได้ และสุดท้าย Δ_{EL} สามารถที่จะหาผลต่าง ของสัญญาณในมุมเงยได้

5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการสร้าง

- ในขั้นตอนการสร้างสายอากาศเฮลิคอลในตอนแรกนั้นสายอากาศเฮลิคอลรับสัญญาณความถี่ไม่ตรงกับที่ต้องการ
- เกิดปัญหาในการพันขดลวดของสายอากาศเฮลิคอล เนื่องจากว่าเป็นสายอากาศที่รับความถี่ค่อนข้างสูง จึงทำให้สายอากาศมีขนาดค่อนข้างเล็ก ทำให้พันขดลวดได้ยาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- และแผ่นปริ๊นที่นำมาใช้มีค่าการสูญเสีย(Loss)มากเกินไป ทำให้การสะท้อนสัญญาณไม่ดีส่งผลทำให้สายอากาศเฮลิคอลที่ได้มีค่า Return Loss ที่สูงเกินกว่าจะนำไปใช้งานได้

- ในการแมตชิ่งสายอากาศเฮลิคอลนั้นได้ใช้กาวร้อนช่วยในการแมตจึงอาจจะทำให้เกิดการการสูญเสียของสัญญาณไปบ้าง

- ในขั้นตอนการบัดกรี คอนเน็คเตอร์ SMA เข้ากับไฮบริดริงจังชั่นทำให้แผ่น FR4 นั้นดำไหม้

- ในขั้นตอนการทดสอบไฮบริดริงจังชั่นจำเป็นต้องต่อโหลด 50 โอห์ม ไว้กับพอร์ตที่ไม่ได้ใช้ด้วย แต่โหลดค่อนข้างมีจำกัด

5.3 แนวทางในการแก้ไขปัญหา

-ในการแก้ไขปัญหาสายอากาศรับความถี่ได้ไม่ตรงกับที่ต้องการนั้นคือต้องทำการแมตชิ่งสายอากาศ โดยในโครงงานชิ้นนี้ได้ใช้ตัวนำไฟฟ้าไปพันกับขดลวดเฮลิคในบางจุดเพื่อช่วยในการแมตชิ่งจึงทำให้สายอากาศรับความถี่ที่ต้องการได้

- ในการพันขดลวดนั้นถ้าเป็นสายอากาศที่มีโครงสร้างใหญ่จะไม่ค่อยเกิดปัญหาในการพัน แต่ในสายอากาศขนาดเล็กพันได้ยากมาก ดังนั้นจึงแก้ปัญหาโดยการนำเอาแม่แบบมาพัน

- เนื่องจากสายอากาศที่ทำในตอนแรกนั้นเกิดปัญหา Return Loss สูง จึงเปลี่ยนแผ่นปริ๊นที่นำมาทำแผ่นสะท้อน เพื่อลด Return Loss

-ในการแมตชิ่งสายอากาศนั้นใช้กาวร้อนเป็นตัวยึดตัวนำที่ใช้ในการแมตชิ่งกับขดลวดของสายอากาศเฮลิคอลซึ่งเป็นสารไดอิเลกตริกจึงทำให้มีการสูญเสียของสัญญาณ จึงเปลี่ยนจากการใช้กาวร้อนมาเป็นการบัดกรีแทน

- ตอนแรกนั้นบัดกรีคอนเน็คเตอร์ค่อนข้างยากทำให้ FR4 ดำแต่ตอนหลังใช้หัวแร้งที่มีวามร้อนมากขึ้นจึงทำให้บัดกรีได้ง่ายและแผ่น FR4 มีรอยดำไหม้น้อยลง

- ปัญหาเรื่องการขาดแคลนโหลดในการทดลอง จึงต้องนำชิฟอาร์รีจิสเตอร์ มาใช้แทนโหลด 50 โอห์ม

5.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากการทำโครงงาน

- เรียนรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติต่างๆของสายอากาศเฮลิคอล คุณลักษณะของสายอากาศเฮลิคอล และสามารถออกแบบสายอากาศเฮลิคอลได้

-เรียนรู้เกี่ยวกับการแก้ไขคุณลักษณะของสายอากาศเมื่อสายอากาศเฮลิคอลมีคุณลักษณะไม่ตรงตามที่เราต้องการ

- ได้ศึกษาและใช้งาน Network Analyzer

- ได้เรียนรู้และเข้าใจเรื่องเฟสของสัญญาณมากขึ้น

- เรียนรู้และศึกษาการใช้โปรแกรม CST ในการออกแบบสายอากาศเฮลิคอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

[1] C. A. Balanis. Antenna Theory: Analysis & Design, John Wiley & Sons. Inc., 1995.

[2] Microstrip Filter For RF/Microwave Application HA- SHEN G.HONG, M.J. LANCESTER

[3] โมไนย ไกรฤกษ์ "ทฤษฎีสายอากาศ" สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, พ.ศ.2541

[4] The Handbook of Antenna Design By Alan W. Rudge

[5] Small Antenna Design (Communications Engineering) by Douglas B.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

คุณลักษณะของกราวเพลนแบบต่างๆ และ FR4

G10

G10 และ FR4 เป็นวัตถุดิบประเภท Glass-Cloth Reinforced Epoxy สีโดยธรรมชาติคือสีเขียวอ่อน เป็นวัตถุดิบที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุสาหกรรมอิเล็กทรอนิคส์ เพราะเป็นวัตถุดิบที่ไม่ดูดซึมน้ำ เป็นฉนวนที่ดี มีเสถียรภาพทางด้านขนาดที่ดีเยี่ยมมีการหดตัวต่ำกว่า 1% ทนต่อแรงทางกลและกระแสไฟฟ้าได้ดี G10 ถือเป็นวัสดุประเภทเดียวกับ FR4 แต่ไม่ใช่วัตถุดิบตัวเดียวกัน FR4เป็นวัตถุดิบเกรดทนไฟของ G10 ดังนั้น FR4 จึงสามารถใช้แทน G10 ได้อย่างปลอดภัย แต่ G10 ไม่สามารถใช้แทน FR4 ได้

G11

G11 และ FR5 เป็นวัตถุดิบประเภท Glass-Cloth Reinforced Epoxy อีกตัวหนึ่ง สีโดยธรรมชาติคือสีเหลืองอำพัน เป็นวัตถุดิบที่มีเกรดใกล้เคียงกับ G10 แต่ G11 จะมีคุณสมบัติทนอุณหภูมิได้สูงกว่า G10 และทำนองเดียวกับ G10/FR4 G11 ถือเป็นวัสดุประเภทเดียวกับ FR5 แต่ไม่ใช่ตัวเดียวกันกัน FR5เป็นวัตถุดิบเกรดทนไฟของ G11 ดังนั้น FR5 จึงสามารถใช้แทน G11 ได้อย่างปลอดภัย แต่ G11 ไม่สามารถใช้แทน FR5 ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Black Epoxy Glass

Black Epoxy Glassเป็นวัตถุดิบเกรดเดียวกับ G11 แต่มีสีดำ สำหรับงานที่ต้องการผิววัสดุเป็นสีดำสำหรับดูดซับแสง แต่ไม่ต้องการคุณสมบัติการทนอุณหภูมิสูงมากเหมือนเบสเพลท

Base Plate L6706B

Base Plate เป็นวัตถุดิบประเภทลามิเนต ที่มีส่วนผสมของไฟเบอร์กล๊าสประสานตัวด้วยเรซิ่นอีพ๊อกซี่ มีคุณสมบัติเด่นด้านไฟฟ้าสถิตซึ่ง Base Plate มีค่า Surface และ Volume Resistivity อยู่ในช่วงของวัสดุกึ่งตัวนำ (Dissipative Material) และสามารถทนความร้อนได้สูงสุดถึง 350 องศาเซลเซียส Base Plate เป็นวัสดุที่ออกแบบมาสำหรับการประกอบ Flex Assembly หรือสำหรับ PCB ที่บางเป็นพิเศษ ด้วยคุณสมบัติทางกายภาพที่ดีเยี่ยม ทำให้ Base Plate สามารถทำงานได้ในสภาวะอุณหภูมิที่สูงถึง 300 องศา (สูงสุด 350 องศาเซียลเซียส) ลักษณะผิวมัน เรียบสนิท Base Plate สามารถใช้งานได้ดีกับ Magic Resin เพื่อยึดชิ้นงานเข้ากับฟิกเจอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณลักษณะของ Connector แบบต่างๆ

คุณลักษณะและคุณสมบัติทางไฟของ Connector แบบต่างๆที่ใช้ในการทำโครงงานนี้ เนื่องจากต้องใช้อุปกรณ์หลายอย่างทำให้ต้อง Connector แบบต่างมาเข้ามาช่วยในการเชื่อมต่อ

N-Type Male Connector [Model NTYPE-Male]

Connector สำหรับเชื่อมต่อระหว่าง Antenna กับ Access Point

คุณสมบัติทางไฟฟ้า

- Impedance : 50 ohm
- Frequency Range : 0-11 GHz
- VSWR Straight : 1.3 Max Right Angle : 1.5 Max
- Working Voltage : 1500 V RMS max at sea level
- Dielectric Withstanding Voltage : 2500V RMS
- Contact Resistance : Center Contact = 1.0 Milliohms Max
- Insulation Resistance : 5 Gohms Minimum
- Insertion Loss : 0.2 dB Max at 10 Ghz
- RF Leakage : -80 dB Minimum

SMA-Reverse Connector [Model SMA-Rev]

หัว Connector สำหรับเชื่อมต่อระหว่าง Antenna กับ Access Point

ยี่ห้อ DLINK, SMC, NETGEAR, LINKSYS (MIMO), 3COM, PLANET และยี่ห้ออื่นที่ใช้หัวต่อแบบ RP-SMA

คุณสมบัติทางไฟฟ้า

- Impedance : 50 ohm
- Frequency Range : 0 to 12.0 GHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Working Voltage • RG-58,141,142,223⟶500 volts rms max

• RG-174,188,316⟶335 volts rms max

• RG-178,196⟶250 volts rms max

- Dielectric Withstanding Voltage

• RG-58,141,142,223⟶1,000 volts rms max

• RG-174,188,316⟶750 volts rms max

• RG-178,196⟶500 volts rms max

- Contact Resistance center contact=3.0 Milliohms max

- outer contact = 2.0 Milliohms max

- Insertion Loss : 0.06 dB max @ 6 GHz

- Insulation Resistance : 5,000 Megohms min

TNC-Reverse Connector [Model TNC-Rev]

หัว Connector สำหรับเชื่อมต่อระหว่าง Antenna กับ Access Point ยี่ห้อ LINKSYS, CISCO และยี่ห้ออื่นที่ใช้หัวต่อแบบ RP-TNC

คุณสมบัติทางไฟฟ้า

- Impedance : 50 ohm

- Frequency Range : 0 to 11.0 GHz

- VSWR Straight : 1.3 max ; Right Angle : 1.35 max

- Working Voltage : 500 volts rms max at sea level

- Dielectric Withstanding Voltage : 1,500 volts rms max at sea level

- Contact Resistance : center contact=1.5 Milliohms max

- outer contact=1.0 Milliohms max

- Insertion Loss : 0.2 dB max @ 3 GHz

- Insulation Resistance : 5,000 Megohms min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N-Type Female 4 hole for build and application [Model NTYPE-Female4hole]

N-Type Female for build and application [Model NTYPE-Female]

N-Type Female เป็น Connector ที่ใช้แพร่กันอย่างทั่วหลายในการทำสายอากาศแบบต่างๆ เช่น สายอากาศแบบ Slotwave, Cantenna, Biquad เป็นต้น

N-Type Female to SMA-Male Adapter [Model NF2SMA]

ตัวแปลงคอนเน็กเตอร์แบบ SMA -Male(plug/male) เป็น N-Type Female สำหรับแปลงคอนเน็คเตอร์ของสายอากาศแบบ Grid 12dBi ให้ใช้กับสายนำสัญญาณแบบ N-Type Male ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

N-Type Female to SMA-Male RP Adapter [Model NF2SMR]

ตัวแปลง Connector สำหรับเชื่อมต่อระหว่าง Antenna กับ Access Point ยี่ห้อ DLINK, SMC, NETGEAR, LINKSYS (MIMO), 3COM, PLANETและยี่ห้ออื่นที่ใช้หัวต่อแบบ RP-SMA ที่ใช้สาย Low loss หัวท้ายเป็น N-Type Male

N-Type Female to TNC-Male RP Adapter [Model NF2TMR]

ตัวแปลงคอนเน็กเตอร์แบบ N-Type เป็น RP-TNC สำหรับแปลงคอนเน็ตเตอร์ของอุปกรณ์ไวร์เลสที่ใช้หัว RP-TNCเช่น LINKSYS, CISCO เป็นหัวต่อแบบ N-Typeเหมาะสำหรับผู้ที่มีอุปกรณ์ที่ออกแบบสำหรับ LINKSYS, CISCOหรือยี่ห้ออื่นที่ใช้คอนเน็กเตอร์แบบ TNC แต่ต้องการนำอุปกรณ์นั้นไปใช้งานกับอุปกรณ์ไวร์เลสที่ใช้คอนเน็กเตอร์แบบ N-Type

N-Type Male to SMA-Female Adapter [Model NM2SFA]

Adapter สำหรับแปลงจาก N-Type maleเป็น SMA female สามารถนำไปประยุกต์ต่อเข้ากับชุดสายสัญญาณแบบ SMA male ได้

SMA-Female RP to TNC-Male RP Adapter [Model SFR2TMR]

ตัวแปลงคอนเน็กเตอร์แบบ RP-TNC (plug/male)เป็น RP-SMA (jack/female) สำหรับแปลงคอนเน็ตเตอร์ของอุปกรณ์ไวร์เลสที่ใช้หัว RP-TNC เช่น LINKSYS, CISCO เป็นหัวต่อแบบ RP-SMA (DLINK, SMC, 3COM, LevelOne) เหมาะสำหรับผู้ที่มีอุปกรณ์ที่ออกแบบสำหรับ DLINK, SMA, 3COM หรือยี่ห้ออื่นที่ใช้คอนเน็กเตอร์แบบ RP-SMA แต่ต้องการนำอุปกรณ์นั้นไปใช้งานกับอุปกรณ์ไวร์เลสที่ใช้คอนเน็กเตอร์แบบ RP-TNC เช่น LINKSYS, CISCO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้